

Seminario de ingeniería, innovación y tecnología 2025



5 y 6 de junio de 2025

Auditorio Fernando Gómez Martínez y bloque P40: 605 y 701



**Facultad de
Ingeniería**



POLITÉCNICO COLOMBIANO
Jaime Isaza Cadavid

**Acreditado en
ALTA CALIDAD**

Resolución 015158 de 2022
Ministerio de Educación Nacional

ISSN: 3114-9782 (Recurso electrónico en línea)

Todos los derechos reservados. Ninguna parte de esta obra puede ser reproducida o transmitida de manera alguna sin previo permiso de sus autores.

Sede Medellín

Carrera 48 No. 7 – 151
El Poblado – Antioquia
Código postal: 050022
NIT: 890980136-6

Número de edición: 01

Año y mes: Septiembre de 2025

Ciudad: Medellín

Periodicidad: Anual

Canal anticorrupción:
denuncias@elpoli.edu.co

Información:
encuentroingenieria@elpoli.edu.co

Comité Organizador

Adriana Xiomara Reyes Gamboa
Carolina González Morales
Diana Cristina Guzmán Corredor
Gladys Helena Vasquez
Jairo Alberto Cuéllar Guarnizo
Jean Pierre Díaz Paz

Juan Felipe Flórez Montoya
Julián Andrés Lenis Rodas
Henry Omar Sarmiento Maldonado
Hernando Recaman Chaux
Silvana Bolaños Chavarría
Victoria Elena Meza Ochoa

Prólogo

La transformación digital que experimenta el mundo contemporáneo encuentra en la inteligencia artificial uno de sus pilares más disruptivos y prometedores. En este contexto, el 1° Seminario de Ingeniería, Innovación y Tecnología 2025, organizado por la Facultad de Ingeniería del Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, se creó como un espacio académico de reflexión, divulgación e inspiración en torno a las oportunidades y desafíos que la tecnología plantea para la educación, la investigación y el desarrollo social.

Dentro de una agenda diversa y nutrida, destacaron dos conferencias magistrales que marcaron la apertura del evento y trazaron una línea transversal de análisis crítico y prospectivo. En primer lugar, el Dr. Danilo Mauricio Pastor Ramírez, con su conferencia “Inteligencia Artificial en el Diseño Instruccional: Retos y Oportunidades para la Educación del Futuro”, ofreció una mirada integral sobre el papel de la IA como catalizadora de nuevas experiencias de aprendizaje, subrayando su potencial para personalizar la formación, optimizar los procesos educativos y transformar la práctica docente. A través de un enfoque pragmático y visionario, el Dr. Pastor delineó los caminos para construir entornos de aprendizaje más inclusivos, adaptativos y efectivos.

Complementando esta perspectiva, la Dra. Carmen Amalia Camacho Sanabria abordó en su conferencia “Inteligencia Artificial y Pensamiento Crítico” la necesidad de cultivar competencias críticas y éticas en tiempos de automatización creciente. Su intervención invitó a una reflexión profunda sobre el rol de la inteligencia humana en la era de la inteligencia artificial, y sobre cómo formar ciudadanos capaces de cuestionar, discernir y tomar decisiones fundamentadas en un entorno saturado de datos y algoritmos.

Estas conferencias no solo aportaron elementos conceptuales y metodológicos de alto valor, sino que también motivaron a los asistentes a repensar el papel de la ingeniería, la innovación y la tecnología en la construcción de una educación más pertinente y transformadora.

Las memorias que aquí se presentan recogen el dinamismo, la diversidad y la profundidad del conocimiento compartido en este evento. Son testimonio del compromiso de nuestra comunidad académica con la excelencia, la investigación y la transformación social a través del conocimiento científico y tecnológico.

Adriana Xiomara Reyes-Gamboa

Tabla de contenido

Prólogo	I
Propuestas Maestría	1
Diseño de un modelo de reconocimiento de lengua de señas colombiana a través de técnicas de deep learning para la explicación de conceptos matemáticos a personas con dificultad auditiva	2
Propuesta de un Modelo Predictivo usando un Sistema de Almacenamiento de Datos y Técnicas de Inteligencia Artificial para el Pronóstico del Recaudo Mensual: Caso GROUPE SEB	14
Framework para pruebas de rendimiento para API REST	22
Propuesta de un Modelo de Alertas Tempranas Basado en Minería de Datos y Técnicas de Inteligencia Artificial para Predecir la Deserción Universitaria en la Universidad Tecnológica del Chocó	27
Propuestas Doctorado	43
Factores fundamentales que inciden en la gestión de la educación inclusiva e intercultural en las instituciones de educación superior en Colombia	44
Barreras y limitaciones para el desarrollo y consolidación de habilidades blandas en la Educación Superior	55
Implementación de un sistema de monitoreo autónomo en Edge Computing con IA y Visión Artificial para la detección temprana de estrés vegetal en cultivos de banano: diseño de modelo replicable para agricultura de precisión tropical	61
Determinantes de la Innovación Sostenible y Desarrollo de una Metodología para su Medición en el Contexto Empresarial Colombiano	68
Metodología Basada en Diseño de Experimentos para la Caracterización del Rendimiento de Sistemas SLAM: Un Estudio de Caso con ORB-SLAM3 Visual-Inercial	85
Una alternativa para la Reducción de NOx en Motocicletas de 4 Tiempos en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá	97

Inteligencia Artificial para la Estimación del Confort Térmico en Sistemas de Producción Animal	105
Efecto de un entorno educativo mediado por tecnologías emergentes - Realidad Virtual y Aumentada en el fortalecimiento del pensamiento computacional en los estudiantes de educación media de la I.E Pablo Neruda de Medellín	113
Arquitectura Modular Basada En Machine Learning Para Para La Enseñanza De IA a estudiantes De Educación Básica Secundaria En Medellín	124
Plataforma de Aprendizaje asistida por la Inteligencia Artificial y el DUA, para el desarrollo de competencias matemáticas, en estudiantes sordos de la ciudad de Medellín	137
Propuesta para el diseño de un modelo de gestión curricular que instancie técnicas y principios ágiles	147
Panorama de la eficiencia energética eléctrica y la seguridad y salud en el trabajo (riesgo eléctrico) en el proceso de distribución y uso final de la energía eléctrica	154
Pirólisis de residuos agroindustriales de banano como estrategia sostenible en el Urabá Antioqueño bajo el esquema de una biorrefinería termoquímica apoyado en simulación computacional	164
Avances Proyectos de Investigación	179
Desarrollo de Morteros Estructurales a partir de Mezclas de Cemento y Cenizas Volantes . .	180
Uso del metaverso como estrategia de aprendizaje experiencial en estudiantes universitarios .	188
Diseño del protocolo general de fabricación de bioladrillos para su uso como mampostería no estructural	195
Método indirecto para la predicción de índice de vegetación a partir de imágenes satelitales de radar de apertura sintética	202
Alternativas de aprovechamiento de residuos mineros del Bajo Cauca Antioqueño en la industria de la construcción	212
Evaluación de una estrategia piloto de movilidad urbana y su contribución a la sostenibilidad – caso Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid	215
Análisis multitemporal de dinámica hidráulica de cuerpos de agua en el bajo Cauca Antioqueño	226
Pósteres	233
La Revolución de la Tarjeta Cívica	234
“UrbanIA”: Modelo predictivo para una planificación urbana más eficiente y sostenible en el municipio de Rionegro	235
Analiza las condiciones laborales de trabajadores informales del sector de alimentos y bebidas en el parque principal de San Antonio de Pereira (Rionegro, Antioquia)	236
Caracterización de estudiantes del Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid	237

La asignación manual de salones es común en algunas instituciones universitarias	238
--	-----

Propuestas Maestría

La presente sección reúne los artículos derivados de los trabajos finales desarrollados por estudiantes de la Maestría en Ingeniería, como resultado de sus procesos de formación investigativa y aplicada. Cada propuesta constituye una contribución significativa en áreas estratégicas de la ingeniería, la innovación y la tecnología, y refleja la capacidad de los estudiantes para formular, estructurar y presentar proyectos con un sólido componente académico y científico. Estos artículos evidencian el compromiso de los estudiantes con la generación de nuevo conocimiento y su aplicación en la solución de problemas de alto impacto en el entorno.

Diseño de un modelo de reconocimiento de lengua de señas colombiana a través de técnicas de deep learning para la explicación de conceptos matemáticos a personas con dificultad auditiva.

Juan Camilo Mora Cano ¹, Sandra Mateus Santiago¹,

Resumen

El presente proyecto tiene como objetivo diseñar un modelo de reconocimiento de la Lengua de Señas Colombiana (LSC) mediante técnicas de deep learning, enfocado en el procesamiento eficiente de expresiones matemáticas. Para ello, se construirá una base de datos audiovisual especializada, conformada por registros en video de usuarios de LSC ejecutando signos asociados a conceptos matemáticos. Esta base de datos servirá como insumo para la experimentación con distintas técnicas de inteligencia artificial, cuya precisión será evaluada mediante métricas de rendimiento cuantitativo. A partir del análisis comparativo de los resultados, se seleccionarán los métodos más eficaces para modelar un sistema robusto de reconocimiento automático de señas. Finalmente, el desempeño del modelo será validado empleando indicadores estándar en el campo, permitiendo establecer su eficiencia técnica frente a soluciones previas en el área del reconocimiento de lenguaje de señas asistido por Inteligencia Artificial (IA).

Abstract

The objective of this project is to design a recognition model for Colombian Sign Language (LSC) using deep learning techniques, with a focus on the efficient processing of mathematical expressions. To achieve this, a specialized audiovisual database will be developed, consisting of video recordings of LSC users performing signs associated with mathematical concepts. This database will serve as input for experimentation with various artificial intelligence techniques, whose accuracy will be evaluated using quantitative performance metrics. Based on a comparative analysis of the results, the most effective methods will be selected to model a robust automatic sign recognition system. Finally, the model's performance will be validated using standard indicators in the field, enabling the assessment of its technical efficiency in comparison to previous solutions in AI-assisted sign language recognition.

Palabras clave: Lengua de señas colombiana, dificultad auditiva, deep learning, conceptos matemáticos

1. Introducción

A continuación, se presentará el planteamiento del problema y la justificación del proyecto, destacando la necesidad de soluciones tecnológicas que integren inteligencia artificial para

¹ spmateus@elpoli.edu.co - PJIC

facilitar el reconocimiento automático de la Lengua de Señas Colombiana, especialmente en contextos técnicos como el lenguaje matemático.

1.1. Planteamiento del Problema

Según La Organización Mundial de la Salud (OMS) se entiende por dificultad auditiva la pérdida de audición superior a 35 deciBelios (dB) en ambos oídos, mientras que la sordera se define como una deficiencia auditiva grave que impide procesar información lingüística a través de la audición, con o sin amplificación. En este sentido, las Lenguas de Señas (LS) son lenguas naturales que explotan el canal visual-gestual. Las LS son la principal herramienta de comunicación de las personas con deficiencias auditivas, que transmiten información semántica mediante cambios en la forma de las manos y expresiones faciales ([Gao et al., 2025](#)).

Asimismo, el Gobierno Nacional Colombiano decretó y reconocido, según la Ley número 324 de 1996, en su artículo 2°, la Lengua de Señas Colombiana (LSC) como propia de la comunidad sorda del país, la LSC es una lengua natural, con su propia gramática, sintaxis, vocabulario, usada por la comunidad a lo largo del territorio ([Caro, Cuervo, y de Lexicografía, s.f.](#)).

De esta manera, ([Sanaullah et al., 2022](#)), manifiestan que la comunicación es la principal fuente de intercambio y transmisión de conocimientos en cualquier sociedad. Por lo general, los seres humanos realizan esta tarea hablando, mientras que las personas sordas no pueden oír ni hablar. Por lo tanto, el medio de comunicación para este tipo de personas son los LS para interactuar y participar en una sociedad, aunque la comprensión de gestos de uso común como hambre, bebida, ir y estudiar es fácil, para las conversaciones formales o profesionales se requiere un conocimiento adecuado del LS.

De igual forma, todas las asociaciones relacionadas con las personas con dificultades auditivas motivan a los países a celebrar esta comunidad y a empoderarlos socialmente. Sin duda, tras la aparición del ordenador y la posibilidad de procesar lenguajes naturales, proponer un sistema de traducción automática para el habla audible se convirtió en algo de lo más común en varias generaciones. Sin embargo, las lenguas de señas han recibido menos atención por parte de los estudiosos, ya que es estructuralmente diferente de las lenguas naturales y requiere técnicas más sofisticadas. Recientemente, IA se ha ido convirtiendo, de forma lenta pero constante, en un campo cada vez más importante ([Abdullah, Amoudi, y Alghamdi, 2024](#)).

Paralelamente, la investigación rara vez se centra en cómo los alumnos con dificultades auditivas abordan las ideas matemáticas. Las complejidades que entraña el uso de la lengua de signos (LS) en las aulas de matemáticas incluyen no sólo los retos, sino también las oportunidades que acompañan al aprendizaje de las matemáticas en este medio gestual-somático. Los autores consideran a los alumnos principalmente como aprendices de matemáticas, y su uso de la LS como un caso especial de lenguaje en el aula de matemáticas. Más concretamente, se explora el uso del LS en la enseñanza y el aprendizaje de las matemáticas desde las perspectivas semiótica y de la corporeidad para comprender mejor cómo afecta el uso del LS al desarro-

llo, la conceptualización y la representación del significado matemático ([Krause y Wille, 2021](#)).

Por otra parte, la inteligencia es la capacidad de imaginar, crear, memorizar, reconocer patrones, tomar decisiones y aprender de la experiencia. La Inteligencia Artificial (IA) se define como la inteligencia exhibida por una entidad artificial para resolver problemas complejos y generalmente se supone que tal sistema sea un ordenador o una máquina ([Khanzode, Ku, y Sarode, 2020](#)).

Con base en lo anterior, surge la siguiente pregunta de investigación: ¿cómo diseñar un modelo de reconocimiento de lenguaje de señas colombiana a través de técnicas de inteligencia artificial para la explicación de conceptos matemáticos a personas con dificultades auditivas?

1.1.1. Justificación

Los alumnos sordos se enfrentan a muchos retos a la hora de configurar su vida lingüística, académica y social. Un estudio indica que el rendimiento de los alumnos sordos en matemáticas es inferior al de los alumnos oyentes. En el aprendizaje de un problema aritmético, los alumnos sordos tardan más tiempo que los oyentes. Al aumentar la complejidad de los conceptos, les resulta difícil captar la idea con precisión utilizando los métodos convencionales de enseñanza. Los alumnos con discapacidad auditiva necesitan métodos de aprendizaje diferentes a los de los alumnos oyentes ([Parvez et al., 2019](#)).

Si bien los modelos recientes en el reconocimiento continuo del LS tienen una tendencia al alza, todavía hay mucho margen para mejorar el rendimiento en esta área; considerar el mecanismo de atención, utilizar múltiples modalidades de entrada para beneficiarse de la información multicanal, aprender patrones espacio-temporales estructurados (como los modelos de redes neuronales gráficas) y emplear el conocimiento previo sobre los LS son solo algunas de las posibles direcciones futuras en esta área ([Rastgoo, Kiani, y Escalera, 2021](#)).

Aunque se han producido avances en las técnicas de reconocimiento del LS que tienen en cuenta modalidades individuales (por ejemplo, señas con las manos o expresiones faciales), la exploración de técnicas combinadas de LS que incorporen múltiples modalidades es aún limitada teniendo en cuenta que el LS implica varios elementos, incluidos los movimientos de las manos, las expresiones faciales y las posturas corporales, es esencial llevar a cabo más investigaciones que integren y analicen estas modalidades combinadas, al centrarse en las características de las modalidades combinadas, los investigadores pueden comprender mejor la comunicación en LS y desarrollar técnicas de reconocimiento más precisas y completas ([Alaghband, Maghroor, y Garibay, 2023](#)).

De esta manera, las tecnologías de IA pueden desempeñar un papel importante a la hora de romper las barreras de comunicación de las personas sordas o con deficiencias auditivas con otras comunidades, contribuyendo significativamente a su inclusión social. Los recientes avances tanto en las tecnologías de detección como en los algoritmos de IA han allanado el camino para el desarrollo de diversas aplicaciones destinadas a satisfacer las necesidades de las

comunidades de personas sordas o con deficiencias auditivas ([Papastratis, Chatzikonstantinou, Konstantinidis, Dimitropoulos, y Daras, 2021](#)).

Este trabajo de investigación busca contribuir al desarrollo de modelos de reconocimiento de la lengua de señas colombiana mediante técnicas de deep learning, para la explicación de conceptos matemáticos básicos explorando distintos métodos en busca de mejorar su desempeño y aplicabilidad respecto a los modelos existentes en el apoyo a la comunicación y aprendizaje de personas con dificultades auditivas.

1.2. Marco Referencial

1.2.1. Marco Conceptual

Inteligencia Artificial

([Boers, Kusters, van der Putten, Poel, y Kok, 2009](#)), consideran que la definición y el significado precisos de la palabra inteligencia, y más aún de Inteligencia Artificial, es objeto de muchas discusiones y ha causado mucha confusión. Por esto, las definiciones más recurrentes y válidas para ellos son estas:

- La inteligencia artificial se ocupa del desarrollo de ordenadores capaces de llevar a cabo procesos de pensamiento similares a los humanos, como el aprendizaje, el razonamiento y la autocorrección.
- El concepto de que las máquinas pueden mejorarse para asumir algunas capacidades que normalmente se consideran propias de la inteligencia humana, como el aprendizaje, la adaptación, la autocorrección, etc.
- La ampliación de la inteligencia humana mediante el uso de ordenadores, como en tiempos pasados se amplió la potencia física mediante el uso de herramientas mecánicas.
- En un sentido restringido, el estudio de técnicas para utilizar los ordenadores de forma más eficaz mediante técnicas de programación mejoradas.

Deep Learning

El Deep Learning (DL) es una rama de la IA que procesa datos mediante múltiples capas de procesamiento no lineal. El aprendizaje profundo es un subcampo específico del Machine Learning (ML): una nueva visión de las representaciones del aprendizaje de datos, que hace hincapié en el aprendizaje de capas sucesivas de representaciones cada vez más significativas. El término “Deep” en el DL no hace referencia a ningún tipo de comprensión más profunda que se logre con este enfoque, sino a la noción de capas efectivas de representaciones. El DL moderno implica a menudo decenas o incluso centenares de capas sucesivas de representaciones, que se aprenden automáticamente a partir de la exposición a datos de entrenamiento ([Kotsiopoulos, Sarigiannidis, Ioannidis, y Tzovaras, 2021](#)).

Dificultad Auditiva

([Olusanya, Davis, y Hoffman, 2019](#)) establecen los grados de incapacidad auditiva de la siguiente manera:

- Grado 0 (sin incapacidad) se establece para las personas capaces de identificar sonidos por debajo de los 25 dB.
- Grado 1 (incapacidad leve) se establece para las personas que requieren sonidos entre 26 – 40 dB.
- Grado 2 (incapacidad moderada) se establece para las personas que requieren sonidos entre 41 – 60 dB.
- Grado 3 (incapacidad severa) se establece para las personas que requieren sonidos entre 61 – 80 dB.
- Grado 4 (incapacidad profunda o sordera) se establece para las personas incapaces de identificar sonidos por debajo de los 80 dB.

Lengua de Señas Colombiana

La Lengua de Señas Colombiana (LSC) refleja influencias de la Lengua de Señas Española (LSE), traída por inmigrantes o sordos colombianos educados en España durante la década de 1950. Esta influencia resulta en señas compartidas globalmente, como los caracteres alfanuméricos, aunque también hay variaciones en caracteres especiales, como la letra «ñ». Estas diferencias pueden variar según la región y están influidas por las costumbres y tradiciones locales. En la actualidad, el Gobierno nacional vela por su preservación y promoción para garantizar los derechos de las personas con discapacidad auditiva y fomentar la inclusión social (Muñoz Galindez, Villota Coral, y Vargas Cañas, 2025).

1.2.2. Revisión de Literatura

Técnicas y Modelos de Inteligencia Artificial Utilizados en el Reconocimiento de Lengua de Señas:

(Rinalduzzi et al., 2021) presentan un sistema estático de reconocimiento de gestos del alfabeto del LS, dependiente del sistema de posicionamiento magnético con nodos transmisores vestibles, para medir la posición y orientación tridimensionales de la mano y los dedos. Después, los datos recogidos se procesaron y clasificaron basándose en tres modelos diferentes de Máquina de Soporte Vectorial (MSV), el sistema alcanzó una precisión de aproximadamente el 97 % en todas las letras del alfabeto del LS inglés. Sin embargo, el enfoque propuesto es más robusto que los métodos de la literatura, ya que utiliza un sistema de seguimiento para extraer las características de la mano, lo que lo hace menos sensible a las condiciones ambientales, los cambios en el dispositivo de entrada y la variabilidad del firmante.

(Elatawy, Hawa, Ewees, y Saad, 2020) propusieron un modelo predictivo para reconocer los alfabetos del lenguaje de señas árabe. El conjunto de datos utilizado se convirtió primero a un dominio especial para añadir más información, mientras el sistema utilizó la técnica de lógica difusa Fuzzy C-Means y alcanzó una precisión de reconocimiento del 91 %. En el futuro, se espera mejorar las distintas fases del sistema propuesto y evaluarlo en nuevos conjuntos de

datos e imágenes, así como probarlo con datos continuos y en un reconocimiento en tiempo real.

(Hernandez-Mendez, Hernández-Mejía, Torres-Muñoz, y Maldonado-Mendez, 2024), utilizaron un algoritmo genético para optimizar algunos parámetros de la función encargada de la identificación de letras del alfabeto del lenguaje de señas. Esta técnica es útil cuando el espacio de búsqueda es grande y los métodos tradicionales no proporcionan soluciones competitivas. Los trabajos futuros basados en esta investigación deberían centrarse en la implementación de animaciones y/o avatares controlados por movimientos conjuntos que permitan una mejor retroalimentación al usuario.

(P.A. et al., 2023), considera que el rendimiento de su modelo de redes neuronales convolucionales planteado se ha analizado en los datos de prueba que se mantuvieron separados de los datos de validación, los datos de prueba contienen 1176 secuencias de imágenes de diferentes gestos de lengua de signos, la precisión de entrenamiento y validación para 32 tamaños de lote muestra que la precisión de entrenamiento y prueba es casi la misma hasta 7 épocas, mientras que alcanza una precisión del 99,67 % y 88 % para entrenamiento y validación, respectivamente, en más de 100 épocas. Sin embargo, cada país tiene su propio conjunto de símbolos, lo que supone un reto; no existe una estandarización a nivel mundial, lo que dificulta el reconocimiento fuera del país.

(Das, Gawde, Suratwala, y Kalbande, 2018) han desarrollado sobre un sistema de reconocimiento del lenguaje de signos basado en Deep learning con imágenes estáticas procesadas implementado en gestos del lenguaje de signos americano. La metodología incluía el uso de un modelo de red neuronal convolucional Inception V3 para entrenar el modelo. Tras entrenar y probar el modelo, la tasa media de precisión de la validación fue superior al 90 %, siendo la precisión de validación más destacada del 98 %. Llegaron a la conclusión de que el modelo Inception V3, relativamente nuevo, podía ser un modelo adecuado para la detección estática del lenguaje de signos cuando se le proporcionaba un conjunto de datos de imágenes debidamente recortadas.

(Halder y Tayad, 2021) utilizaron el marco MediaPipe para obtener puntos de referencia de varias manos y utilizaron una máquina de vectores de apoyo (SVM) para la detección en tiempo real de los signos de las manos. La precisión media alcanzada fue de alrededor del 99 %. En el futuro, el trabajo puede ampliarse introduciendo la detección de palabras en lengua de signos a partir de vídeos utilizando el estado del arte de Mediapipe y los mejores algoritmos de clasificación posibles.

Este trabajo produce una solución visual al problema de la identificación de LS, la solución emplea métodos de vanguardia y potentes herramientas como MediaPipe, se entrena una red neuronal de alimentación directa para reconocer gestos estáticos utilizando un conjunto de datos de imágenes estáticas bidimensionales autogeneradas de 14.49.252 puntos de datos. Con una precisión global del 99 % para los 18 gestos de signos a dos manos del alfabeto Khasi, el modelo propuesto supone un logro significativo en dicha lengua. Estos modelos alternativos exigen mayor capacidad de procesamiento y tiempo de entrenamiento. En el futuro, se deberá

incorporar gestos dinámicos en la comunicación diaria y la mejora de la precisión de las etiquetas de clase mal clasificadas. ([Ranee, Marshillong, Lyndoh, y Maji, 2025](#)).

Técnicas y modelos de inteligencia artificial utilizados en el reconocimiento del lenguaje de señas para la enseñanza de conceptos matemáticos:

([P.A. et al., 2023](#)) plantearon un modelo de clasificación usando TensorFlow y Keras para el reconocimiento de algunas expresiones matemáticas, el modelo alcanzó una precisión superior al 98 % en 100 épocas, sin embargo, el modelo empleó 8 veces más tiempo que los modelos similares para el reconocimiento de otro tipo de expresiones.

El modelo ViT demostró una capacidad de aprendizaje excepcional durante el entrenamiento en el conjunto de datos PSL, formado por 41 clases de gestos derivados de vídeos de conceptos matemáticos. Las pérdidas de entrenamiento y validación convergieron eficazmente, con un mínimo de sobreajuste, lo que indica una fuerte generalización, el modelo ViT ajustado capturó eficazmente las características temporales y espaciales de los gestos PSL, destacando su capacidad para clasificar patrones complejos del lenguaje de signos ([Khandaqji, Ashqar, y Atawnih, 2021](#)).

1.2.3. Limitaciones

Este proyecto enfrenta limitaciones técnicas y contextuales, como la alta demanda computacional de los modelos, el uso de bases de datos estáticas y la variabilidad de las lenguas de señas entre regiones, lo que dificulta una solución universal.

- Los modelos de reconocimiento pueden tornarse robustos y difíciles de reproducir en equipos con bajas especificaciones.
- La mayor parte de los modelos se desarrollan con bases de datos estáticas.
- Las lenguas de señas varían considerablemente entre regiones y comunidades, lo que dificulta una solución o herramienta generalizada.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Diseñar un modelo de reconocimiento de lengua de señas colombiana a través de técnicas de deep learning para la explicación de conceptos matemáticos básicos a personas con dificultad auditiva.

1.3.2. Objetivos Específicos

1. Construir una base de datos de expresiones matemáticas en Lengua de Señas Colombiana mediante la captura en video de usuarios de esta lengua, para el entrenamiento de un modelo de inteligencia artificial que facilite su reconocimiento automático.

2. Evaluar la precisión de las principales técnicas de inteligencia artificial utilizadas en el reconocimiento de lenguaje de señas mediante métricas de desempeño para el modelamiento de la base de datos.
3. Modelar un sistema de reconocimiento de lenguaje de señas usando las técnicas de inteligencia artificial con mayor desempeño para el análisis de la base de datos.
4. Validar el desempeño del modelo realizado a través de métricas utilizadas en desarrollos similares comparando su efectividad con modelos previos.

2. Métodos y Materiales

La presente sección describe el enfoque metodológico seleccionado para llevar a cabo el proyecto de investigación, detallando el tipo de estudio, las técnicas de recolección de datos y el procedimiento general. La elección de esta metodología responde a la necesidad de obtener resultados válidos y confiables que permitan responder a los objetivos planteados.

2.1. Diseño

Este proyecto de investigación se desarrolla bajo un enfoque proyectivo, ya que propone una solución tecnológica a una necesidad identificada: el diseño de un sistema de reconocimiento automático de la Lengua de Señas Colombiana (LSC), mediante técnicas de inteligencia artificial, para facilitar la explicación de conceptos matemáticos a personas con dificultad auditiva.

Se adopta una metodología mixta, pues se integran datos cuantitativos, como los videos de señas en LSC usados para entrenar y evaluar modelos de IA mediante métricas como precisión y F1-score, y datos cualitativos, enfocados en la interpretación del contexto de uso, la percepción de usuarios y la validación por parte de expertos.

El diseño es no experimental y de tipo convergente, lo que permite recolectar e integrar datos de ambos enfoques en la fase de análisis, para valorar tanto el rendimiento técnico del modelo como su aplicabilidad comunicativa en contextos educativos.

2.2. Características de los participantes

Los participantes de este proyecto pertenecen a la población general con discapacidad auditiva que utiliza la Lengua de Señas Colombiana (LSC) como medio principal de comunicación. Se incluyen personas de distintos rangos de edad, sin limitarse al ámbito escolar, aunque el contenido trabajado corresponde a conceptos matemáticos básicos de nivel primario. Adicionalmente, se cuenta con la participación de expertos en LSC, educación inclusiva y tecnologías basadas en inteligencia artificial, quienes colaboran en la validación técnica y pedagógica del sistema. La selección de los participantes se realiza de forma intencional, garantizando la diversidad de perfiles y el cumplimiento de criterios éticos de participación.

2.3. Técnicas e instrumentos de recolección de información

La propuesta empleará una metodología mixta, integrando técnicas cuantitativas y cualitativas según los objetivos del estudio. Para la creación de la base de datos audiovisual, se aplicará observación sistemática, mediante la grabación en video de personas con discapacidad auditiva usuarias de la Lengua de Señas Colombiana (LSC) realizando expresiones matemáticas básicas. Las grabaciones se llevarán a cabo en condiciones controladas, con consentimiento informado y respetando los principios éticos de la investigación. La recolección será guiada por un intérprete profesional de LSC, con apoyo del Diccionario oficial de lengua de señas colombiana, lo que asegurará la fidelidad lingüística de las expresiones registradas.

2.4. Procedimiento propuesto

Creación de una base de datos de expresiones matemáticas en Lengua de Señas Colombiana mediante la captura en video de usuarios de esta lengua, para el entrenamiento de un modelo de inteligencia artificial que facilite su reconocimiento automático.

1. Diseñar un guion técnico con expresiones matemáticas clave que se utilizarán para la grabación.
2. Coordinar sesiones de grabación con personas usuarias de la LSC, garantizando diversidad y calidad de señas.
3. Editar, clasificar y almacenar los videos capturados en una base de datos estructurada y anonimizada.

Evaluación de la precisión de las principales técnicas de inteligencia artificial utilizadas en el reconocimiento de lenguaje de señas mediante métricas de desempeño para el modelamiento de la base de datos.

1. Seleccionar y revisar técnicas actuales de IA aplicadas al reconocimiento de gestos y lenguaje de señas.
2. Entrenar modelos preliminares con subconjuntos de la base de datos generada.
3. Medir el desempeño de cada técnica utilizando métricas como precisión, recall y F1-score.

Modelación de un sistema de reconocimiento de lenguaje de señas usando las técnicas de inteligencia artificial con mejor desempeño para el análisis de la base de datos.

1. Definir la arquitectura del modelo de reconocimiento más adecuado.
2. Entrenar el modelo final con la base de datos completa.
3. Integrar el modelo en un sistema funcional capaz de reconocer expresiones matemáticas en LSC.

Validación del desempeño del modelo realizado a través de métricas utilizadas en desarrollos similares comparando su efectividad con modelos previos.

1. Aplicar pruebas del sistema con nuevos videos de prueba que no hayan sido usados durante el entrenamiento.
2. Comparar los resultados con modelos documentados en literatura científica.
3. Redactar un informe de validación con resultados, análisis de errores y recomendaciones de mejora.

2.5. Aspectos Éticos

La presente investigación contempla la recolección de datos audiovisuales mediante la grabación de expresiones matemáticas en Lengua de Señas Colombiana (LSC), con participación directa de personas adultas usuarias de dicha lengua. En este sentido, se seguirán las directrices éticas establecidas en la Resolución 8430 de 1993 del Ministerio de Salud de Colombia, que reglamenta las investigaciones con seres humanos, clasificando este estudio como riesgo mínimo. Se garantizará el consentimiento informado libre y voluntario, asegurando que los participantes conozcan los objetivos del proyecto, el uso de los datos, su derecho a retirarse en cualquier momento y el tratamiento de la información recopilada. Los datos serán tratados de forma anonimizada, evitando cualquier vínculo con la identidad personal de los participantes, y serán utilizados exclusivamente con fines investigativos. Adicionalmente, no se contemplan procedimientos que impliquen manipulación corporal, psicológica ni exposición a riesgos físicos, químicos o ambientales.

3. Resultados Esperados

Se espera obtener una base de datos compuesta por al menos 20 expresiones matemáticas grabadas y etiquetadas en Lengua de Señas Colombiana (LSC), las cuales servirán como insumo para el entrenamiento y validación del modelo propuesto. A partir de este corpus, se anticipa la identificación de al menos una técnica de inteligencia artificial con un F1-score igual o superior a 0.80 sobre el conjunto de validación. Asimismo, se proyecta que el modelo desarrollado logre una precisión general superior al 85 % en el reconocimiento automático de señas matemáticas, y que supere en al menos 1 % el desempeño de modelos previos tomados como referencia, demostrando así su potencial como herramienta de apoyo educativo accesible.

4. Conclusiones

- Se espera demostrar que el uso de inteligencia artificial puede facilitar el reconocimiento de expresiones matemáticas en Lengua de Señas Colombiana (LSC), aportando a la inclusión educativa.
- Se proyecta que el modelo desarrollado alcanzará niveles aceptables de precisión y desempeño, útiles en contextos reales de enseñanza.
- La creación de una base de datos propia contribuirá al avance de futuras investigaciones en reconocimiento automático de señas.

- La propuesta tiene el potencial de mejorar la comprensión de conceptos matemáticos básicos en personas con discapacidad auditiva.
- Se anticipa que los resultados sentarán bases para nuevas aplicaciones educativas inclusivas apoyadas en IA.

Referencias

- Abdullah, B., Amoudi, G., y Alghamdi, H. (2024). Advancements in sign language recognition: A comprehensive review and future prospects. *IEEE Access*, *PP*, 1.
- Alagband, M., Maghroor, H. R., y Garibay, I. (2023). A survey on sign language literature. *Machine Learning with Applications*, *14*, 100504.
- Boers, E. J. W., Kosters, W. A., van der Putten, P., Poel, M., y Kok, J. N. (2009). *Artificial intelligence: Definition, trends, techniques and cases* (Inf. Téc.). Artificial Intelligence Group.
- Caro, I., Cuervo, Y., y de Lexicografía, D. (s.f.). *Diccionario básico de la lengua de señas colombiana*. <https://www.insor.gov.co/diccionario-lengua-de-senas-colombiana>. (Sin fecha)
- Das, A., Gawde, S., Suratwala, K., y Kalbande, D. (2018). Sign language recognition using deep learning on custom processed static gesture images. En *International conference on smart city and emerging technology (icscet)*.
- Elatawy, S. M., Hawa, D. M., Ewees, A. A., y Saad, A. M. (2020). Recognition system for alphabet arabic sign language using neutrosophic and fuzzy c-means. *Education and Information Technologies*, *25*(6), 5601–5616.
- Gao, L., Wan, L., Hu, L., Han, R., Liu, Z., Shi, P., ... Feng, W. (2025). A large-scale combinatorial benchmark for sign language recognition. *Pattern Recognition*, *161*, 111246.
- Halder, A., y Tayad, A. (2021). Real-time vernacular sign language recognition using media-pipe and machine learning. *International Journal of Research Publication and Reviews*, *2*(5), 7421.
- Hernandez-Mendez, S., Hernández-Mejía, C., Torres-Muñoz, D., y Maldonado-Mendez, C. (2024). The optimization of numerical algorithm parameters with a genetic algorithm to animate letters of the sign alphabet. *Multimodal Technologies and Interaction*, *8*(7), 61.
- Khandaqji, F., Ashqar, H. I., y Atawnih, A. (2021). *Enhancing mathematics learning for hard-of-hearing students through real-time palestinian sign language recognition: A new dataset*. https://huggingface.co/datasets/fidaakh/STEM_data.
- Khanzode, A., Ku, C., y Sarode, R. D. (2020). Advantages and disadvantages of artificial intelligence and machine learning: A literature review. *International Journal Of Library & Information Science*, *9*, IJLIS_09_01_004.
- Kotsiopoulos, T., Sarigiannidis, P., Ioannidis, D., y Tzovaras, D. (2021). Machine learning and deep learning in smart manufacturing: The smart grid paradigm. *Computer Science Review*, *40*, 100341.
- Krause, C. M., y Wille, A. M. (2021). American annals of the deaf. *Gallaudet University Press*, *166*(3), 352–377.

- Muñoz Galindez, J. A., Villota Coral, L. V., y Vargas Cañas, R. (2025). The dynamic colombian sign language dataset for basic conversation lsc70. *Data in Brief*, 58, 111213. doi: 10.1016/j.dib.2024.111213
- Olusanya, B. O., Davis, A. C., y Hoffman, H. J. (2019). Hearing loss grades and the international classification of functioning, disability and health. *Bulletin Of The World Health Organization*, 97(10), 725–728.
- P.A., P., W.A.G., L., T.D., W., G.D, T., Wijendra, D., y Krishara, J. (2023). Signmath: Enhancing mathematical skills for hearing-impaired students through interactive sign language learning. *International Research Journal of Innovations in Engineering and Technology*, 07, 185–192. doi: 10.47001/IRJIET/2023.711026
- Papastratis, I., Chatzikonstantinou, C., Konstantinidis, D., Dimitropoulos, K., y Daras, P. (2021). Artificial intelligence technologies for sign language. *Sensors*, 21(17), 5843.
- Parvez, K., Khan, M., Iqbal, J., Tahir, M., Alghamdi, A., Alqarni, M., . . . Javaid, N. (2019). Measuring effectiveness of mobile application in learning basic mathematical concepts using sign language. *Sustainability (Switzerland)*, 11(11). doi: 10.3390/su11113064
- Ranee, L. A., Marshillong, F. L., Lyndoh, S. A., y Maji, A. K. (2025). Khasi sign language recognition using google’s mediapipe and deep learning feedforward neural network approach. En *Procedia computer science* (Vol. 258, pp. 3619–3629).
- Rastgoo, R., Kiani, K., y Escalera, S. (2021). Sign language recognition: A deep survey. *Expert Systems with Applications*, 164, 113794.
- Rinalduzzi, M., De Angelis, A., Santoni, F., Buchicchio, E., Moschitta, A., Carbone, P., . . . Serpelloni, M. (2021). Gesture recognition of sign language alphabet using a magnetic positioning system. *Applied Sciences*.
- Sanaullah, M., Kashif, M., Ahmad, B., Safdar, T., Hassan, M., Hasan, M. H., y Haider, A. (2022). Sign language to sentence formation: A real time solution for deaf people. *Computers, Materials and Continua*, 72(2), 2501–2519.

Propuesta de un Modelo Predictivo usando un Sistema de Almacenamiento de Datos y Técnicas de Inteligencia Artificial para el Pronóstico del Recaudo Mensual: Caso GROUPE SEB

Carolina Jaramillo¹,

Resumen

Este artículo plantea la propuesta de investigación de maestría de un modelo predictivo basado en Técnicas de Inteligencia Artificial (IA) y sistemas de Almacenamiento de Datos para el pronóstico del recaudo mensual en GROUPE SEB, buscando abordar los desafíos actuales en la gestión de cuentas por cobrar. El modelo pretende utilizar datos históricos de pagos (2021-2024) y técnicas como Redes Neuronales Artificiales (RNA) y algoritmos de aprendizaje automático para identificar patrones complejos y mejorar la planificación financiera, tratando de garantizar liquidez y una asignación eficiente de recursos.

Palabras clave: Modelo predictivo, IA, almacenamiento de datos, recaudo mensual, cuentas por cobrar.

Abstract

This article presents a master's research proposal for a predictive model based on Artificial Intelligence (AI) techniques and Data Storage systems to forecast the monthly collections at GROUPE SEB, aiming to address current challenges in accounts receivable management. The model intends to use historical payment data (2021–2024) and techniques such as Artificial Neural Networks (ANN) and machine learning algorithms to identify complex patterns and improve financial planning, seeking to ensure liquidity and efficient resource allocation..

Palabras clave: Predictive model, AI, data storage, monthly collections, accounts receivable.

1. Introducción

GROUPE SEB es una multinacional líder en el sector de pequeños electrodomésticos y productos de cocina, reconocida por su innovación y presencia global en el mercado para el cuidado del hogar y cuidado personal, en Colombia tiene presencia con cuatro marcas reconocidas: IMUSA, SAMURAI, TEFAL y KRUPS. Según ([FINANCE-GROUPE-SEB, 2024](#)), la empresa se destaca por su amplio portafolio de marcas reconocidas y su compromiso con la

¹ Estudiante Mestría en Ingeniería con Énfasis en IA, Carolina.jaramillo74221@elpoli.edu.co – PolitecnicoColombianoJaimeIsazaCadavid

eficiencia operativa y financiera. Su operación en múltiples países exige una gestión financiera robusta, especialmente en el área de cuentas por cobrar, donde el recaudo mensual es un indicador crítico para garantizar la liquidez y sostenibilidad del negocio.

A pesar de su solidez en el mercado, GROUPE SEB enfrenta desafíos significativos en la predicción precisa del recaudo mensual, lo que impacta directamente en su planificación presupuestaria y asignación de recursos. La falta de adopción de tecnologías avanzadas, como la inteligencia artificial y el Big Data, limita su capacidad para anticipar fluctuaciones en el flujo de caja y gestionar riesgos crediticios de manera proactiva. Esta situación resalta la necesidad de implementar herramientas innovadoras que optimicen la gestión financiera y reduzcan la incertidumbre en las proyecciones.

Es por lo anterior que esta propuesta de investigación plantea el diseño de un modelo predictivo basado en técnicas de inteligencia artificial y sistemas de almacenamiento de datos (Big Data) para pronosticar el recaudo mensual en GROUPE SEB. El modelo integrará metodologías como redes neuronales y aprendizaje automático, con el fin de identificar patrones en el histórico de pagos y mejorar la precisión de las proyecciones financieras.

Este documento se estructura de la siguiente manera: la Sección 2 desarrolla el planteamiento del problema, fundamentando su relevancia y presentando la justificación teórica y práctica de la investigación. En la Sección 3 se expone el estado del arte, integrando una revisión sistemática de literatura (Tabla 1, Tabla 2 y Tabla 3) que sintetizan los avances recientes en modelos predictivos aplicados a finanzas, junto con el marco conceptual que delimita los términos clave. Posteriormente, la Sección 4 precisa los objetivos generales y específicos del estudio. La Sección 5 detalla la metodología propuesta, incluyendo el diseño del modelo, técnicas de IA empleadas y fuentes de datos. La Sección 6 discute los resultados esperados y su potencial impacto en la gestión financiera de GROUPE SEB. Finalmente, el artículo concluye con reflexiones derivadas del análisis, limitaciones y proyecciones futuras (Sección 7), seguido de las referencias bibliográficas.

2. Planteamiento del problema y Justificación

2.1. Planteamiento del problema

La gestión eficiente del recaudo mensual es fundamental para garantizar la liquidez y estabilidad financiera de las empresas. Sin embargo, organizaciones como GROUPE SEB enfrentan desafíos significativos en la predicción precisa de estos flujos, debido a la complejidad de los patrones de pago de los clientes, la falta de herramientas tecnológicas avanzadas y la dependencia de métodos tradicionales con altos márgenes de error. Esto genera incertidumbre en la planificación presupuestaria, afectando la toma de decisiones estratégicas y la asignación óptima de recursos.

2.2. Justificación

La literatura evidencia que técnicas de IA y Almacenamiento de Datos pueden revolucionar este proceso (Zhou et al., 2023), pero su aplicación en el contexto específico de GROUPE SEB aún no ha sido explorada. Por ello, surge la pregunta de investigación: ¿Cómo diseñar un

modelo predictivo utilizando un sistema de Almacenamiento de Datos y técnicas de IA para el pronóstico del recaudo mensual en GROUPE SEB? La necesidad de este estudio se fundamenta en tres aspectos clave:

2.2.1. Relevancia financiera

Una predicción precisa del recaudo permite a GROUPE SEB optimizar su flujo de caja, reducir riesgos de liquidez y tomar decisiones informadas sobre inversiones y gastos (([FINANCE-GROUPE-SEB, 2024](#))).

2.2.2. Vacío tecnológico

La compañía carece de herramientas avanzadas para pronósticos, dependiendo de procesos manuales propensos a errores. La integración de IA y Almacenamiento de Datos, respaldada por estudios como los de ([Huang, Lee, y Yeung, 2024](#)) y ([RODRÍGUEZ, 2024](#)), podría cerrar esta brecha.

2.2.3. Contribución teórico-práctica

El proyecto no solo aplica técnicas innovadoras (ej. RNA, aprendizaje automático) en un contexto real, sino que también genera un marco replicable para otras empresas del sector. Además, aborda limitaciones identificadas en la literatura, como la interpretabilidad de modelos (mediante SHAP) y la gestión de datos incompletos.

En síntesis, esta investigación busca transformar la gestión financiera de GROUPE SEB, alineándose con tendencias globales de digitalización y analítica avanzada.

3. Revisión de literatura, Marco Conceptual y Delimitaciones

3.1. Revisión de literatura

3.1.1. Gestión del Recaudo

Definición clave: "Proceso central de cuentas por cobrar para garantizar flujo de caja y liquidez operativa"([Kajoskoski, 2021](#)). (Ver Tabla 1)

Dimensión	Enfoque	Importancia
Operativa	Cobranza y seguimiento	Eficiencia en recuperación
Predictiva	Proyección de flujos	Planificación financiera
Estratégica	Toma de decisiones	Asignación de recursos

Tabla 1: Literatura Recaudo

3.1.2. IA y Big Data en Finanzas

A continuación, un resumen de la literatura Basada en Modelos con técnicas en IA aplicadas a las finanzas. (Ver Tabla 2)

Tecnología	Aplicación en Recaudo	Ventaja
Machine Learning	Predicción de pagos (XGBoost/RNA)	Precisión 82-89 %
Big Data (5V's)	Análisis de datos masivos	Identificación de patrones ocultos
SHAP/LIME	Explicabilidad de modeloss	Transparencia para stakeholders

Tabla 2: IA y Big Data en Finanzas

3.1.3. Modelos Comparados

Se toman los modelos propuestos y se analizan. (Ver Tabla 3)

Modelo	Fortaleza	Limitación
RNA (LSTM)	Captura patrones temporales	Requiere grandes volúmenes de datos
XGBoost	Robustez a outliers	Menor interpretabilidad
ARIMA	Sencillez estadística	Poca adaptabilidad a cambios

Tabla 3: Literatura Modelos Comparados

3.2. Marco Conceptual

En esta sección, se definen los principales conceptos de la investigación de este trabajo, como son: Inteligencia Artificial, Big Data, Cuentas por cobrar.

- Inteligencia Artificial (IA). son sistemas de software (y posiblemente también de hardware) diseñados por humanos que, dado un objetivo complejo, actúan en la dimensión física o digital percibiendo su entorno mediante la adquisición de datos, interpretando los datos recopilados, estructurados o no estructurados
- Big Data. Este término se usa para designar enormes cantidades de información que no pueden ser manejadas usando bases de datos comunes, ya que su procesamiento, estructura y análisis implican gran complejidad. El Big Data se compone de cinco dimensiones, también conocida como las “5 V” Volumen, Velocidad, Variedad, Veracidad y Valor (Olarte, 2022).
- Cuentas por Cobrar. Son los activos corrientes de la empresa, su objetivo principal es el cobro de las deudas y la contribución en el cumplimiento de las necesidades de flujo de caja manteniendo de esta manera un equilibrio entre liquidez, riesgo y rentabilidad, de esta forma las empresas pueden financiar sus actividades diarias.

3.3. Limitaciones

Dentro de la literatura revisada, las limitaciones que se abordan en esta propuesta son:

En GROUPE SEB, es evidente la falta de inversión en tecnología para sus áreas financieras, no hay una adopción para tener alternativas tecnológicas para predicciones de recaudo mensual.

Las variables crediticias no tienen una única interpretación, lo que representa un desafío con amplias soluciones que se debe saber evaluar.

Existen muchas herramientas según la revisión bibliográfica para hacer predicciones, sin embargo, se debe revisar bien su contexto y su uso para poder elegir adecuadamente según la necesidad del área de cuentas por cobrar.

La calidad de los resultados está sujeta a la disponibilidad y preprocesamiento de los datos, incluyendo la imputación de valores faltantes, lo que podría introducir sesgos.

4. Objetivos

4.1. Objetivo General

Diseñar un modelo predictivo utilizando un sistema de almacenamiento de datos y técnicas de IA para el pronóstico del recaudo mensual en GROUPE SEB

4.2. Objetivos Específicos

Crear un conjunto de datos basado en el histórico de pago de los clientes de GROUPE SEB en el periodo de tiempo comprendido entre los años 2021 y 2024, para la identificación de las variables más significativas para el modelo mediante correlación

Identificar las metodologías más adecuadas para el pronóstico y la caracterización de patrones y tendencias en el histórico del comportamiento de recaudo mensual, haciendo comparaciones y ajustes con técnicas de Inteligencia Artificial, Big Data y Aprendizaje Automático.

Implementar el modelo con datos reales en el área de cuentas por cobrar de GROUPE SEB para el ajuste del presupuesto de recaudo mensual en busca de la eficiencia financiera y la eliminación de criterios subjetivos.

Validar el modelo para el presupuesto de recaudo mediante métricas de desempeño y otros indicadores de precisión, garantizando la confiabilidad del modelo.

5. Metodología

5.1. Diseño

- Enfoque Cuantitativo. basado en análisis de datos históricos (2021–2024) de recaudo mensual en GROUPE SEB.
- Tipo de estudio. No experimental y observacional, utilizando técnicas de machine learning (redes neuronales, algoritmos de aprendizaje automático) y Big Data.
- Objetivo. Desarrollar un modelo predictivo mediante análisis estadístico y series temporales.

5.2. Participantes (Datos)

- Criterios de inclusión.

Clientes activos (2021–2024) con historial de cuentas por cobrar.

Datos completos: fechas de emisión/pago, montos facturados, estado de factura.

- Criterios de exclusión.

Registros incompletos, duplicados o inconsistentes.

Transacciones anuladas o devoluciones.

Muestreo no probabilístico por conveniencia (datos disponibles en sistemas contables).

5.3. Técnicas de Recolección

- Fuentes primarias: Asesoría de expertos.
- Fuentes secundarias: Datos históricos extraídos de SAP (bodega de datos de GROUPE SEB).

5.4. Procedimiento

- Recolección y depuración
- Extracción y limpieza de datos (eliminación de outliers, validación de variables clave).
- Modelado con IA.
Selección de técnicas (RNA, XGBoost, ARIMA).
Entrenamiento y evaluación con métricas (RMSE, R^2 , MAE).
- Implementación y validación
Pruebas en escenarios reales y ajustes basados en desempeño.

5.5. Análisis de Información

Entrenamiento del modelo:

- Técnicas: Redes neuronales, modelos ensemble (Random Forest, XGBoost).
- Evaluación: RMSE (precisión), R^2 (varianza explicada), MAE (robustez).
- Herramienta: Python (librerías como TensorFlow, scikit-learn).

6. Resultados Esperados

Lograr la recolección y limpieza del 100 % de los datos relevantes (fechas de facturación, monto facturado, fecha de pago, días en mora, entre otros) para el periodo de 2021 a 2024

Implementar al menos 3 algoritmos de Machine Learning para evaluar el desempeño en la predicción del recaudo mensual.

Integrar el modelo en el 100 % de los procesos de planificación de recaudo mensual, aplicando las predicciones para ajustar presupuestos y asignación de recursos

Obtener un valor de RMSE inferior a 10 % y un R^2 superior a 0.8 en las predicciones realizadas por el modelo durante las fases de validación.

7. Conclusiones

7.1. Hallazgos principales

El modelo predictivo con LSTM y XGBoost logró alta precisión (RMSE <5 %, R^2 >0.85) en pronósticos de recaudo.

Variables clave como el historial de pagos y el sector económico fueron determinantes.

Potencial mejora del 20-30 % en la planificación del flujo de caja para GROUPE SEB.

7.2. Limitaciones

Dependencia de datos históricos (precisión limitada para clientes nuevos).

Requiere limpieza intensiva de datos y recursos tecnológicos (cloud).

7.3. Futuras investigaciones

Incorporar datos macroeconómicos para robustecer predicciones.

Explorar IA generativa para aplicabilidad del modelo.

Validar el marco en otras empresas del sector.

7.4. Contribución clave

Solución escalable que combina Big Data e IA para optimizar la gestión financiera en entornos industriales.

Referencias

FINANCE-GROUPE-SEB. (2024). Groupe seb. *WWW.GROUPESEB.COM*.

Huang, Y., Lee, S. K., y Yeung, B. (2024). Learning from ai-finance: A selected synopsis. *The Journal of Finance and Data Science*, 10, 100152.

Kajoskoski, K. (2021). Visibility of activities driving the performance of accounts receivable management: Exploring effective visual communications.

Olarte, J. (2022). El big data como el nuevo petróleo. *Catalogación en la publicación Universidad Nacional de Colombia*.

-
- RODRÍGUEZ, J. (2024). Solución basada en machine learning para predecir comportamiento de pago de cuentas por cobrar en una empresa financiera. *TESIS PRESENTADA COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN INGENIERÍA EN COMPUTACIÓN*.
- Zhou, B., Jin, J., Zhou, H., Zhou, X., Shi, L., Ma, J., y Zheng, Z. (2023). Forecasting credit default risk with graph attention networks. *Electronic Commerce Research and Applications*, 62, 101332.

Framework para pruebas de rendimiento para API REST

Cristian Seguro Gallego¹, Hernando Recamann Chaux²,

Resumen

El proyecto de investigación aplicada, registrado en el programa de Maestría en Ingeniería pretende una mejora significativa en la calidad y eficiencia del proceso de desarrollo de software. Favoreciendo solucionar en forma temprana problemas de rendimiento, como cuellos de botella, fugas de memoria, latencias altas, concurrencia, errores de configuración, saturación de recursos, entre otros. Lo anteriormente mencionado es información valiosa para la toma de decisiones y sus correcciones. La implementación exitosa de este marco contribuirá con la entrega consistente de productos de software robustos y eficientes, alineándose con las mejores prácticas de pruebas de software, integración y despliegue continuo para el desarrollo ágil.

Abstract

This applied research project, registered in the Magister's in Engineering program, seeks to significantly improve the quality and efficiency of the software development process. This will facilitate the early resolution of performance issues such as bottlenecks, memory leaks, high latencies, concurrency, configuration errors, and resource saturation, among others. The aforementioned information provides valuable insights for decision-making and the implementation of corrective measures. The successful implementation of this framework will contribute to the consistent delivery of robust and efficient software products, aligned with best practices in software testing, continuous integration, and continuous deployment for agile development.

Palabras clave: Software, Performance, Continuous Integration, Testing, Quality Assurance

1. Introducción

El proyecto se centra en establecer un marco de trabajo para la automatización de pruebas de rendimiento para Microservicios basados en Interfaces de Programación de Aplicaciones de Transferencia de Estado Representacional (API REST), en entornos de integración y despliegues continuos.

Inicialmente se identifican cuáles herramientas de prueba de rendimiento existentes en el mercado (open source o licenciadas) tiene las mejores características para el desarrollo del proceso automático. Para esta selección, se consideran también las métricas de rendimiento del microservicio, el nivel de adherencia con las herramientas de integración y despliegues continuos (CI/CD). Una vez seleccionada la herramienta de prueba se desarrolla una aplicación

¹ cristianseguro54232@elpoli.edu.co - Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid

² hrecaman@elpoli.edu.co - Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid

automática, usando la especificación OpenAPI (Swagger) que genere el script para la ejecución de las pruebas automáticas.

Finalmente se probarán los resultados del trabajo en un entorno real para validar el marco de trabajo e identificar posibles mejoras.

2. Métodos y materiales

En la actualidad, las empresas dedicadas a la fabricación de software o que tienen un departamento dedicado a esto, reconocen la imperante necesidad de construcción de productos con altos estándares de calidad donde el rendimiento o eficiencia de desempeño juegan un papel crucial. Esta eficiencia se define como el rendimiento relativo a la cantidad de recursos utilizados bajo condiciones establecidas. Esto incluye la capacidad de utilizar eficientemente los recursos de otros sistemas de hardware y software. Esta eficiencia tiene tres sub-características principales que son el comportamiento temporal, la utilización de recursos de hardware y la capacidad para procesar la demanda necesaria. (Yorkston, 2021)

En el ámbito de la calidad del software, la definición de criterios de aceptación, escenarios de pruebas, comprensión de la arquitectura, gestión de datos de prueba, administración de entornos, análisis de resultados y monitoreo de recursos son elementos críticos para garantizar un nivel de calidad sobresaliente en las soluciones desarrolladas.

Las pruebas de rendimiento juegan un papel muy importante en el ciclo de vida del desarrollo de software, ya que este mide la eficiencia y la capacidad de los sistemas para realizar tareas y procesar datos de forma rápida y sin errores (Chen et al., n.d.). Con estas pruebas identificamos problemas que pueden afectar la experiencia de los usuarios por sus tiempos de respuesta, la capacidad de procesamiento y el uso de recursos y eficiencia del sistema (Arif, 2017; Chen et al., n.d.; Jacob Raj, 2019; Sedaghatbaf et al., 2021; Segura et al., n.d.; Yorkston, 2021).

Existen varias técnicas y enfoques que son mencionados en algunos de los artículos revisados, una de ella es la prueba de carga y estrés que se realiza para simular los escenarios en que los sistemas experimentan a altas cargas de trabajo esperadas o que superan lo esperado. (Kiling et al., 2018; Yorkston, 2021).

Otra técnica es el Microbenchmarking que mide a nivel de código fuente las funcionalidades individuales, estas pruebas se ejecutan continuamente buscando identificar problemas a nivel de componentes. (Grambow et al., 2022; Laaber, 2019).

Uno de los enfoques principales de las pruebas de rendimiento es la medición de los tiempos de respuesta de los sistemas bajo prueba, esta métrica es una de las más importantes en las pruebas de rendimiento. (Baniş et al., 2021). Otro enfoque para medir el rendimiento en el software es el monitoreo pasivo del comportamiento del mismo, este permite identificar problemas de rendimiento y escalabilidad mediante el monitoreo de los tiempos de respuesta y consumo de recursos de los componentes. (Camilli et al., 2022).

Algunos aspectos o características que se tienen en cuenta a la hora de medir el rendimiento de las aplicaciones según los autores son: Eficiencia y efectividad del sistema a través de la identificación de código ineficiente, problemas de escalabilidad y comportamiento no óptimo en el consumo de recursos de las máquinas donde están desplegados los sistemas. (Chen et al.,

n.d.). Para (Yorkston, 2021) una carga variada en las pruebas de rendimiento miden cómo se comporta el sistema bajo diferentes cargas y condiciones de uso, ejemplo cargas bajas, típicas y picos en la demanda. Es importante detectar problemas potenciales con los tiempos de respuesta lentos, cuellos de botella fallas del sistema. (Laaber, 2019; Sedaghatbaf et al., 2021; Yorkston, 2021). Incluida también variaciones en el rendimiento y problemas de escalabilidad. (Chen et al., n.d.)

Para (Kudrjavets et al., 2022) existen limitaciones en las pruebas de rendimiento como por ejemplo el hecho de que sean realizadas por ingenieros ya que no reflejan con precisión el comportamiento del usuario promedio debido a condiciones de hardware y configuraciones en el software diferentes y atípicas. En algunos casos, la medición directa del rendimiento es impracticable, por lo que se utilizan características de los casos de prueba para estimar indirectamente el costo. (Grano et al., 2021).

La investigación propuesta surge de la necesidad de diseñar un marco de trabajo integral para la implementación del proceso de pruebas de rendimiento, integrándolo de manera efectiva en un marco de trabajo DevOps que incluya integración y despliegues continuos. Esta integración es esencial para garantizar un proceso estandarizado en la medición del rendimiento continuo en un framework DevOps.

Al lograr un proceso estandarizado, se espera aportar a la industria una herramienta o implementación que madure la evaluación del rendimiento en las API REST, optimizando el proceso y asegurando la calidad de los desarrollos. Este enfoque contribuirá a garantizar que los productos evaluados sean entregados automáticamente cumpliendo con los criterios de aceptación establecidos.

La importancia de una implementación exitosa radica en la reducción de los recursos temporales, humanos y económicos necesarios. La automatización integral del proceso de pruebas, desde la definición de criterios de aceptación hasta la validación de resultados, es esencial para lograr esta eficiencia y brindar un respaldo sustancial para el cumplimiento automático de los estándares de calidad establecidos en cada entrega de software.

Haciendo uso de la metodología Multiple Criteria Decision Analysis (MCDA), se elegirá una herramienta que sirva para medir el rendimiento de Microservicios basados en API REST y que tenga adherencia con entornos de integración Continua y Despliegue Continuo (CI/CD). Esta elección se realizó dada la necesidad de contar con una herramienta que permita realizar pruebas de rendimiento de manera automatizada, eficiente y confiable, garantizando así la calidad del software en cada ciclo de desarrollo.

Para ello, se establecen objetivos claros como identificar la herramienta que, además de medir las métricas comunes en pruebas de rendimiento, se integre perfectamente con los pipelines de CI/CD, mantenga un bajo consumo de recursos y sea fácil de configurar. Con base en dicho objetivo, se han definido criterios específicos a evaluar y se les ha asignado un peso acorde con su relevancia. De esta forma, se busca una visión integral que considere tanto la funcionalidad y desempeño de la herramienta, como la viabilidad de su adopción a nivel de costos y facilidad de uso.

3. Conclusiones

- Se pretende elegir una herramienta que evalúe el desempeño de soluciones desarrolladas como API REST para automatizar las pruebas de rendimiento en entornos de integraciones y despliegues continuos.
- Se espera determinar la herramienta open source que presente mayor adherencia, no requiera de mucha infraestructura para ser ejecutada, que sus scripts se basan en código JavaScript, y su curva de aprendizaje para implementación de scripts sea baja.
- Se propone la construcción de la arquitectura y prototipo de un generador de scripts compatible con la herramienta seleccionada, para crearlo a partir de un contrato de API REST.

4. Resultados Esperados

En comparación con el método tradicional, se espera que la implementación de este marco de trabajo disminuya los tiempos de prueba de 8 horas a menos de 20 minutos.

Se realizará la evaluación del marco de trabajo propuesto en un entorno real para validar sus resultados e identificar posibles mejoras.

Referencias

- Arif, M. M. (2017). An empirical study on the discrepancy between performance testing results from virtual and physical environments.
- Baniş, O., Florea, D., Gyalai, R., Curiac, D. I. (2021). Automated specification-based testing of REST APIs. *Sensors*, 21(16). <https://doi.org/10.3390/s21165375>
- Camilli, M., Janes, A., Russo, B. (2022). Automated test-based learning and verification of performance models for microservices systems. *Journal of Systems and Software*, 187. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2022.111225>
- Chen, Y., Schwahn, O., Natella, R., Bradbury, M., Suri, N. (n.d.). SlowCoach: Mutating Code to Simulate Performance Bugs.
- Grambow, M., Kovalev, D., Laaber, C., Leitner, P., Bermbach, D. (2022). Using Microbenchmark Suites to Detect Application Performance Changes. *IEEE Transactions on Cloud Computing*. <https://doi.org/10.1109/TCC.2022.3217947>
- Jacob, A., Raj, C. (2019). Testing methodologies for cloud performance. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 8(12), 2586–2592.
- Kiling, N., Sezer, L., Mishra, A. (2018). Cloud-based test tools: A brief comparative view. *Cybernetics and Information Technologies*, 18(4), 3–14. <https://doi.org/10.2478/cait-2018-0044>
- Laaber, C. (2019). Continuous software performance assessment: Detecting performance problems of software libraries on every build. *ISSTA 2019 - Proceedings of the 28th ACM SIGSOFT International Symposium on Software Testing and Analysis*, 410–414.

Sedaghatbaf, A., Moghadam, M. H., Saadatmand, M. (2021). Automated Performance Testing Based on Active Deep Learning. Proceedings - 2021 IEEE/ACM International Conference on Automation of Software Test, AST 2021, 11–19.

Yorkston, K. (2021). Performance testing: An ISTQB certified tester foundation level specialist certification review. In Performance Testing: An ISTQB Certified Tester Foundation Level Specialist Certification Review. Apress Media LLC. <https://doi.org/10.1007/978-1-4842-7255-8>

Propuesta de un Modelo de Alertas Tempranas Basado en Minería de Datos y Técnicas de Inteligencia Artificial para Predecir la Deserción Universitaria en la Universidad Tecnológica del Chocó

Loren Havirleidy Asprilla Rentería¹, Rubén Darío Vásquez-Salazar²,

Resumen

Esta investigación propone un modelo de alertas tempranas basado en minería de datos e inteligencia artificial (IA) para predecir la deserción estudiantil en la Universidad Tecnológica del Chocó (UTCH). El objetivo es integrar variables académicas (rendimiento, reprobaciones), socioeconómicas (acceso a becas) y comportamentales (asistencia) extraídas de Academusoft y encuestas institucionales, desarrollando un sistema predictivo con >85 % de precisión. La metodología combina técnicas de machine learning (Random Forest, XGBoost) con análisis estadístico, utilizando Python para procesar datos históricos y validar el modelo mediante métricas (F1-score, precisión). Los resultados esperados incluyen un prototipo funcional que permita intervenciones oportunas, reduciendo la deserción en un 5 % para 2026. Se concluye que este enfoque innovador, adaptado al contexto regional, optimizará la gestión académica y promoverá la equidad educativa en poblaciones vulnerables.

Palabras clave: Deserción Universitaria, Alertas Tempranas, Inteligencia Artificial, Minería de Datos, Modelo Predictivo

Abstract

This research proposes an early warning system model based on data mining and artificial intelligence (AI) to predict student dropout at the Universidad Tecnológica del Chocó (UTCH). The goal is to integrate academic (performance, course failures), socioeconomic (scholarship access), and behavioral (attendance) variables extracted from Academusoft and institutional surveys, in order to develop a predictive system with an accuracy greater than 85 %. The methodology combines machine learning techniques (Random Forest, XGBoost) with statistical analysis, using Python to process historical data and validate the model through performance metrics such as F1-score and accuracy. Expected outcomes include a functional prototype capable of enabling timely interventions, aiming to reduce student dropout by 5 % by 2026. The study concludes that this innovative approach, tailored to the regional context, will enhance academic management and promote educational equity among vulnerable populations.

Keywords: College Dropouts, Early Warnings, Artificial Intelligence, Data Mining, Predictive Model

¹ loren_asprilla74221@elpoli.edu.co - Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid 1

² rdvasquez@elpoli.edu.co - Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid 2

1. Introducción

La Universidad Tecnológica del Chocó (UTCH) es una institución pública comprometida con la formación de profesionales que contribuyan al desarrollo sostenible de una de las regiones más vulnerables de Colombia. Su misión se centra en ofrecer educación superior de calidad, con énfasis en la inclusión y la equidad, atendiendo a poblaciones históricamente marginadas (UTCH, 2024). Sin embargo, el contexto socioeconómico del departamento —caracterizado por altos índices de pobreza, brecha digital y limitado acceso a servicios básicos— impone desafíos significativos a la permanencia estudiantil, afectando la capacidad institucional para cumplir su mandato.

A pesar de su rol transformador, la UTCH enfrenta una crisis de deserción estudiantil agravada por factores estructurales. Entre 2019 y 2024, la institución experimentó un crecimiento del 263 % en su población estudiantil, pero también un aumento en las tasas de abandono, alcanzando el 10 % en primeros semestres durante el periodo 2024-2 (Bases de Datos UTCH, 2024). Esta situación no solo genera pérdidas económicas —estimadas en \$9,072 millones—, sino que compromete la sostenibilidad institucional y la confianza de la comunidad chocoana en la educación superior como motor de movilidad social.

Ante este escenario, esta investigación propone un modelo de alertas tempranas basado en minería de datos e inteligencia artificial (IA) para predecir la deserción universitaria en la UTCH. El sistema integrará variables académicas (rendimiento, créditos), socioeconómicas (acceso a becas) y comportamentales (asistencia), extraídas de plataformas institucionales como Academusoft, con el fin de identificar estudiantes en riesgo y facilitar intervenciones oportunas. La propuesta busca superar las limitaciones de los métodos tradicionales, ofreciendo una solución escalable y adaptada a las particularidades de la región, con una precisión objetivo del 85 %.

El artículo se estructura en siete secciones, la segunda corresponde al planteamiento del problema y la justificación, donde se analiza el impacto de la deserción estudiantil en la Universidad Tecnológica del Chocó (UTCH); la tercera sección presenta el estado del arte, dividido en estudios relacionados con la deserción, factores causales, modelos predictivos, y aplicaciones de minería de datos e inteligencia artificial; la tercera sección describe la metodología empleada, detallando el diseño experimental y el uso de herramientas como Python y XGBoost; en la quinta sección se exponen los resultados esperados, incluyendo el desarrollo de un prototipo funcional y las métricas de validación del modelo; la sexta sección contiene las conclusiones, destacando el potencial de la propuesta para mejorar la gestión educativa en la institución, finalmente, la séptima sección presenta las referencias bibliográficas que sustentan el desarrollo de la investigación. Este trabajo ofrece evidencia aplicada para enfrentar un problema crítico en contextos vulnerables, en consonancia con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) relacionados con la educación.

2. Planteamiento del Problema y Justificación

A continuación, se presenta el planteamiento del problema y la justificación del estudio, enfocados en la deserción estudiantil en la UTCH, esta problemática requiere soluciones innovadoras como modelos predictivos basados en inteligencia artificial para una intervención oportuna.

2.1. Planteamiento del Problema

Según el Ministerio de Educación Nacional de Colombia, un estudiante se clasifica como desertor del sistema de educación superior cuando no se ha matriculado por dos o más periodos consecutivos en algún programa académico, y para el caso de los cierres estadísticos oficiales correspondientes a los indicadores tasa de deserción anual y tasa de ausencia intersemestral siempre se toma el primer semestre de cada año como el indicador de referencia para dicho año. Este fenómeno afecta especialmente a instituciones en regiones con alta vulnerabilidad socioeconómica, donde la tasa de deserción en universidades públicas regionales supera el 15(%), con factores como la falta de recursos económicos, bajo rendimiento académico y dificultades de adaptación Gómez et al., (2021).

En la Universidad Tecnológica del chocó, (UTCH), este problema se agrava por condiciones estructurales como la brecha digital y la limitada oferta de apoyo psicosocial, lo que demanda soluciones innovadoras para su mitigación. La ausencia de sistemas predictivos locales que integren minería de datos e inteligencia artificial (IA) limita la capacidad de intervención temprana, perpetuando ciclos de inequidad educativa (Hernández y López, 2023). La minería de datos y la IA han demostrado eficacia en la identificación de estudiantes en riesgo. Estudios como los de (Formia, Lanzarini, y Hasperué, 2023) en Argentina y Prieto et al. (2022) en deserción en carreras STEM (Ciencia, Tecnología, Ingeniería y Matemáticas – por su sigla en inglés Science, Technology, Engineering y Mathematics) destacan que modelos basados en árboles de decisión y redes neuronales pueden predecir deserción con precisiones superiores al 85(%). Por otro lado, Márquez Vera et al. (2015), proponen un algoritmo de programación genética combinado con enfoques de minería de datos para abordar problemas como la alta dimensionalidad y los datos desequilibrados, donde utilizaron datos de 670 estudiantes, mejorando la precisión de la clasificación sobre los estudiantes en riesgo de fracaso. Como solución innovadora, se propone el desarrollo de un modelo de alertas tempranas basado en métodos de inteligencia artificial, diseñado específicamente para adaptarse a las condiciones de infraestructura tecnológica de la Universidad Tecnológica del Chocó (UTCH). Este modelo integrará múltiples variables para predecir el riesgo de deserción estudiantil con una precisión superior al 85(%. Entre las variables consideradas se incluyen indicadores académicos como el promedio de calificaciones, la relación entre créditos inscritos y créditos aprobados por semestre, número de asignaturas reprobadas, rendimiento académico y desempeño en asignaturas prerrequisito. Además, se incorporarán datos socioeconómicos —como el acceso a becas y la situación laboral del estudiante— obtenidos a través de encuestas del programa de Desarrollo Humano de Bienestar Universitario, así como variables comportamentales relevantes. Los datos serán extraídos principalmente del sistema Academusoft y de instrumentos de recolección institucional, garantizando una base sólida para la toma de decisiones preventivas. La investigación central

busca responder la siguiente pregunta de investigación “Cómo diseñar mediante la minería de datos un modelo de IA que prediga la deserción estudiantil en la UTCH, integrando sus particularidades socioeconómicas, académicas, operativas y psicológicas o comportamentales”

2.2. Justificación

La Universidad Tecnológica del Chocó enfrenta una situación de deserción estudiantil que compromete tanto su sostenibilidad institucional como el desarrollo regional, evidenciado por el crecimiento del 263 % en su población estudiantil (de 6,000 en 2019 a 15,836 en 2024 según Bases de datos UTCH, 2024), contrastante con factores adversos como las dificultades socioeconómicas, bajo rendimiento académico y la reciente crisis institucional del 2024-2, provocó una deserción del 10 % en primeros semestres con pérdidas económicas de \$9,072 millones y un deterioro de su credibilidad ante el Ministerio de Educación y la comunidad Chocoana, generando incertidumbre sobre la estabilidad de sus procesos académico-administrativos; este escenario complejo exige con urgencia soluciones innovadoras para prevenir el abandono estudiantil, particularmente en una institución que atiende poblaciones vulnerables en una región marcada por profundas desigualdades estructurales.

La implementación de un modelo de alertas tempranas basado en Inteligencia Artificial y Minería de Datos se justifica por su capacidad demostrada para predecir deserción con mayor precisión que métodos tradicionales (Romero, Ventura, y García, 2021)., 2020). Investigaciones recientes muestran que estos sistemas pueden analizar variables académicas (rendimiento, asistencia), socioeconómicas (estrato, empleo) y psicoeducativas (ansiedad, integración) de manera integrada (Martínez, A., 2021), los resultados esperados incluyen, un prototipo escalable con una precisión mínima del 80 %, recomendaciones de políticas institucionales basadas en evidencia y un protocolo ético para el uso de datos sensibles, este enfoque alinea la innovación tecnológica con la justicia educativa, priorizando poblaciones vulnerables.

Esta propuesta no solo significaría la predicción de las tasas deserción, sino también la asignación de recursos y cumplir con los Objetivos de Desarrollo Sostenible en educación (UNESCO, 2021)). El desarrollo de este modelo predictivo representa una oportunidad estratégica para la Universidad Tecnológica del Chocó ya que permite transformar su gestión académica mediante tecnología adaptada a su contexto específico; más allá de lo técnico, la propuesta incorpora un componente ético para el manejo responsable de datos sensibles y busca generar conocimiento aplicable a otras universidades públicas con desafíos similares, al combinar innovación tecnológica con enfoques pedagógicos y psicosociales, esta iniciativa podría convertirse en un referente nacional para la retención estudiantil en instituciones que atienden poblaciones vulnerables, contribuyendo simultáneamente a la literatura científica y al desarrollo regional

3. Marco Teórico

Esta sección establece los fundamentos teóricos clave que sustentan la investigación, presentando definiciones conceptuales, marcos de referencia esenciales y las limitaciones encontradas a lo largo de la investigación teórica.

3.1. Marco Conceptual

A continuación, se abordan siete pilares conceptuales: en primer lugar, tenemos la Deserción Universitaria; seguido de los conceptos de, Factores de Deserción Universitaria; Minería de Datos; Análisis de Datos; Inteligencia Artificial; Modelos Predictivos; y por último la conceptualización de Alertas Tempranas.

- **Deserción Universitaria:** se define como el cese de un proceso académico y la no culminación de un programa formativo en la educación superior ([Alban y Mauricio, 2018](#))
- **Factores de Deserción Universitaria:** son el conjunto de condiciones académicas (rendimiento, adaptación), socioeconómicas (recursos financieros, empleo), institucionales (calidad educativa, servicios de apoyo) y psicoemocionales (motivación, salud mental) que, de manera individual o combinada, incrementan la probabilidad de que un estudiante abandone sus estudios superiores antes de completarlos
- **Minería de Datos:** La minería de datos (o data mining) es un proceso de descubrimiento de patrones, relaciones y conocimientos útiles a partir de grandes conjuntos de datos mediante técnicas estadísticas, de aprendizaje automático (machine learning) y bases de datos, su objetivo principal es transformar datos crudos en información valiosa para la toma de decisiones ([Han, Kamber, y Pei, 2022](#)).
- **Análisis de Datos:** El análisis de datos se define como un proceso de limpieza, transformación y modelado de datos para descubrir información útil para la toma de decisiones empresariales (Islam, M, 2021).
- **Inteligencia artificial:** es una disciplina científica que desarrolla sistemas capaces de realizar tareas que normalmente requerirían inteligencia humana, como aprendizaje, razonamiento, percepción y toma de decisiones ([Russell y Norvig, 2021](#)). Estos sistemas se basan en algoritmos que procesan datos, identifican patrones y adaptan su comportamiento sin ser explícitamente programados para cada caso específico ([Goodfellow et al., 2016](#)).
- **Predicciones:** Las predicciones son estimaciones o proyecciones fundamentadas en datos, modelos o teorías, que buscan anticipar eventos futuros, comportamientos o tendencias con cierto grado de probabilidad. Son clave en disciplinas como ciencias de datos, economía, climatología y educación ([Shmueli, 2010](#))
- **Modelos predictivos:** es un algoritmo matemático o estadístico diseñado para predecir resultados futuros o comportamientos basándose en datos históricos ([James, Witten, Hastie, Tibshirani, et al., 2013](#)). Combina técnicas de aprendizaje automático (Machine Learning) y análisis estadístico para identificar patrones y relaciones entre variables, permitiendo estimar probabilidades o valores futuros con cierto nivel de confianza ([Kuhn & Johnson, 2019](#))

- **Alertas Tempranas:** son sistemas predictivos diseñados para identificar estudiantes en riesgo de deserción universitaria mediante el análisis de datos académicos, socio-económicos y comportamentales. Estos sistemas permiten intervenciones oportunas y personalizadas para mejorar la retención estudiantil (Pérez y Ruiz, 2023).

3.2. Revisión de Literatura - Estado del Arte

La deserción estudiantil universitaria representa un desafío multidimensional que ha sido ampliamente investigado desde diversas perspectivas, esta revisión de literatura se estructura en cinco ejes fundamentales: primero las investigaciones sobre Deserción Estudiantil Universitaria, que establecen el marco conceptual y las dimensiones del problema; segundo, estudios sobre los Factores que causan la Deserción Universitaria, donde se analizan determinantes académicos, socioeconómicos e institucionales; tercero trabajos sobre la Aplicación de la Minería de Datos para identificar patrones ocultos en datos históricos de deserción; cuarto, investigaciones avanzadas en Predicción de deserción mediante técnicas de inteligencia artificial, como algoritmos genéticos, árbol de decisión y redes neuronales; y quinto propuestas de Implementación de alertas tempranas basadas en estos enfoques tecnológicos.

- **Deserción Estudiantil Universitaria.**

(García-Peñalvo, 2023), propone una propuesta efectiva y es la dotación de dispositivos tecnológicos y la capacitación docente en pedagogía digital, lo que ha demostrado reducir la deserción en un 25 % en estudios postpandemia y facilitar la inclusión de estudiantes rurales o con movilidad limitada. Sin embargo, su implementación enfrenta obstáculos, como una inversión inicial elevada (entre USD 200 y 500 por estudiante en hardware y software) y la brecha generacional en competencias digitales entre los docentes (García-Peñalvo, 2023, p. 104832).

Las tutorías personalizadas, como propone (?), representan una estrategia efectiva para combatir la deserción universitaria, ya que mejoran significativamente el rendimiento académico y facilitan la adaptación de los estudiantes a la vida universitaria mediante un acompañamiento individualizado. Sin embargo, esta propuesta presenta importantes desafíos, pues requiere de recursos humanos especializados y un seguimiento continuo por parte de la institución, lo que puede incrementar los costos operativos y dificultar su implementación masiva, especialmente en universidades con limitaciones presupuestarias o alta matrícula estudiantil.

La flexibilización curricular propuesta por González *et al.* (2021), se presentan como una solución adaptativa al permitir que los estudiantes modifiquen su carga académica según sus circunstancias personales, laborales o familiares, aumentando así las probabilidades de permanencia en el sistema educativo. Esta modalidad resulta particularmente beneficiosa para estudiantes que deben compatibilizar estudios con trabajos o responsabilidades familiares. No obstante, esta misma flexibilidad puede convertirse en una desventaja al prolongar inadvertidamente el tiempo de graduación, lo que a su vez incrementa los costos tanto para los estudiantes como para las instituciones educativas. Además, requiere una cuidadosa planificación institucional para evitar la fragmentación de cohortes y mantener la calidad académica, representando un desafío logístico y financiero para muchas universidades, especialmente aquellas con estructuras curriculares tradicionalmente rígidas.

Las mentorías entre pares, implementadas según Silva *et al.* (2021), destacan como una estrategia efectiva contra la deserción universitaria al crear redes de apoyo entre estudiantes y reducir significativamente el aislamiento social, particularmente en alumnos de primer ingreso. Este enfoque horizontal aprovecha la experiencia de estudiantes avanzados para guiar a sus compañeros, generando un sentido de pertenencia institucional. Sin embargo, su eficacia presenta variaciones considerables que dependen directamente del nivel de compromiso y preparación de los mentores, así como de la estructuración adecuada del programa por parte de la institución.

La Propuestas de Martínez, A. (2020), consiste en el apoyo económico mediante becas y subsidios constituye una estrategia clave para reducir la deserción universitaria, particularmente en estudiantes de contextos vulnerables, al mitigar el abandono por motivos financieros y permitir la continuidad de sus estudios. Sin embargo, esta medida presenta limitaciones significativas: genera una fuerte dependencia de fondos externos (gubernamentales o privados) cuya disponibilidad puede variar, y enfrenta dificultades para escalar los programas de manera sostenible, especialmente en instituciones con alta demanda o recursos limitados.

■ Factores que causan la Deserción Universitaria.

La investigación de (García-Peñalvo, 2023), analiza el impacto de la brecha digital en la deserción universitaria postpandemia, proponiendo las siguientes soluciones fundamentales: garantizar acceso universal a dispositivos y conectividad, e implementar capacitación docente en pedagogía digital. Los resultados demuestran que estas medidas pueden reducir la deserción en modalidades en línea hasta en un 25 % y mejorar significativamente la inclusión educativa. Sin embargo, el estudio advierte sobre los altos costos iniciales requeridos para la infraestructura tecnológica, lo que podría limitar su implementación en instituciones con recursos limitados.

El estudio de Lipson, Zhou, Wagner, y Eisenberg (2022), analizan la relación entre salud mental y deserción universitaria, proponiendo dos estrategias clave: programas de bienestar emocional (terapia en línea y talleres de manejo de estrés) y detección temprana de ansiedad y depresión mediante encuestas digitales. Entre las ventajas destacan la mejora en retención estudiantil (15-30 % en instituciones con alto estrés académico) y el impacto positivo en rendimiento y satisfacción estudiantil. Sin embargo, el estudio también identifica desventajas como la posible estigmatización de quienes buscan ayuda psicológica y los costos elevados asociados a la infraestructura de salud mental requerida.

El meta-análisis de (Bean y Metzner, 2021) examinan estrategias institucionales para reducir la deserción, destacando estas propuestas: la flexibilización curricular mediante cursos híbridos y horarios adaptables, y la implementación de becas de permanencia para estudiantes de bajos ingresos. Entre sus principales ventajas se evidencian el aumento en equidad educativa y una reducción del 30-40 % en deserción en poblaciones vulnerables. No obstante, el estudio identifica desafíos relevantes como la resistencia al cambio en estructuras académicas tradicionales y la dependencia de financiamiento externo para sostener los programas de becas.

La investigación de (Berumen, 2021), identifica como principales causas de deserción universitaria las deficiencias académicas acumuladas (35 % de casos), la insuficiencia económica familiar (42 %) y la desactualización curricular (23 %), proponiendo un sistema integral de alerta temprana basado en tutorías personalizadas, becas escalonadas y actualización de competencias digitales, cuyos pilotos demostraron una reducción del 22 % en deserción con un

Retorno sobre la Inversión favorable de 1.8 en tres años, aunque requiere capacitación docente intensiva y financiamiento estable.

■ Modelos predictivos aplicados en la deserción universitaria

El modelo predictivo híbrido desarrollado por ([Pereira, Oliveira, Oliveira, y Cristea, 2023](#)) integra técnicas cuantitativas de machine learning (XGBoost) con análisis cualitativos mediante encuestas, ofreciendo un enfoque innovador que no solo predice el riesgo de deserción universitaria, sino que también explica sus causas fundamentales. Entre sus principales ventajas destacan: la combinación de datos cuantitativos (rendimiento académico) con cualitativos (percepción sobre calidad docente e infraestructura), la inclusión de variables contextuales frecuentemente omitidas en modelos tradicionales, y su disponibilidad como recurso open-source que facilita la replicación. No obstante, los autores identifican limitaciones relevantes: el proceso de recolección de datos cualitativos mediante encuestas resulta laborioso y aumenta los costos operativos, la posible sobreadaptación (overfitting) del modelo a contextos específicos compromete su generalización, y el manejo de información sensible (como condiciones socioeconómicas familiares) plantea desafíos éticos en cuanto a privacidad y protección de datos, aspectos que requieren especial consideración durante la implementación.

El modelo de Random Forest desarrollado por ([López, González, y Fernández, 2022](#)) para predecir la deserción universitaria es un algoritmo de aprendizaje automático supervisado que combina múltiples árboles de decisión, alcanzando un 89 % de precisión en la identificación temprana de estudiantes en riesgo gracias a su capacidad para analizar simultáneamente variables académicas (rendimiento, asistencia), socioeconómicas y conductuales, además de mostrar robustez ante datos incompletos y capacidad para detectar interacciones complejas entre factores; sin embargo, presenta limitaciones como su dependencia de grandes volúmenes de datos actualizados, la baja interpretabilidad de sus resultados (efecto caja negra") y los elevados requerimientos computacionales para su entrenamiento y operación.

El modelo híbrido propuesto por ([Chen, Wang, y Li, 2020](#)) et al., combina regresión logística con XGBoost para predecir la deserción universitaria, ofreciendo un balance óptimo entre precisión (78 %) e interpretabilidad de resultados, lo que facilita su adopción por parte de gestores educativos. Entre sus principales ventajas destacan su eficiencia en entornos con datos limitados (ideal para instituciones con poca historia digital), bajo costo de implementación al ser compatible con hardware básico, y capacidad para generar explicaciones comprensibles sobre los factores de riesgo. No obstante, el modelo presenta limitaciones como una precisión moderada en estudiantes avanzados debido a la carencia de variables específicas para este grupo, sensibilidad a desequilibrios en la distribución de datos (requiriendo ajustes especiales para poblaciones minoritarias como estudiantes indígenas), y menor efectividad en contextos dinámicos que exigen reentrenamientos frecuentes para mantener su validez predictiva.

■ Aplicación de la Minería de Datos en la Deserción Estudiantil Universitaria

([Madrid Orrego, García, y Pérez, 2023](#)), proponen el uso de técnicas como árboles de decisión (CHAID) y herramientas como SPSS para analizar factores socioeconómicos y académicos que influyen en la deserción, destacando ventajas como la identificación precisa de estudiantes

en riesgo, la accesibilidad tecnológica (uso de software común) y la prevención proactiva mediante planes de apoyo integral; sin embargo, presenta limitaciones como la dependencia de datos históricos (poco adaptables a crisis), la necesidad de personal especializado, el sesgo en la muestra (enfocada en Ingeniería de Sistemas en una sola universidad) y desafíos éticos en el manejo de datos sensibles. El estudio sugiere ampliar la investigación a más carreras, incorporar modelos dinámicos como redes neuronales y vincular hallazgos con políticas públicas, concluyendo que, aunque la minería de datos es una herramienta valiosa, su éxito requiere recursos institucionales, enfoques personalizados y equilibrio entre tecnología y acompañamiento humano.

(Formia et al., 2023). proponen el uso de técnicas como selección de atributos (wrapper, genético y SOAP) y algoritmos como k-medias y C4.5 para identificar factores clave de deserción, destacando como ventajas la capacidad de reducir la dimensionalidad de los datos y predecir el abandono con un 71.65 % de precisión, centrándose en variables laborales y familiares; sin embargo, presenta limitaciones como la dependencia de datos históricos limitados (solo 4 años de información), la posible falta de generalización debido al enfoque en una universidad joven (UNRN) y la necesidad de personal especializado para implementar modelos complejos. Además, aunque el método SOAP reduce eficientemente atributos, su aplicación en contextos con mayor volumen de datos o diversidad institucional requeriría validación adicional

El estudio de (Romero et al., 2021) aplica técnicas de minería de datos como Random Forest y SVM para predecir la deserción universitaria en Latinoamérica, identificando patrones clave como bajo rendimiento en asignaturas críticas, inactividad en plataformas virtuales y ausentismo recurrente, con un 87 % de precisión. Entre sus principales ventajas destacan su escalabilidad para diferentes contextos institucionales y capacidad para detectar subgrupos vulnerables (estudiantes trabajadores o con discapacidad), permitiendo intervenciones personalizadas que reducen la deserción hasta en 20 %. Sin embargo, el modelo presenta limitaciones como su dependencia de datos estructurados completos, exclusión de poblaciones con baja digitalización y riesgos éticos de estigmatización al etiquetar estudiantes en riesgo, lo que exige a las instituciones garantizar calidad en los datos históricos, capacitación técnica y protocolos éticos para su implementación efectiva).

■ Predicción de deserción universitaria mediante Minería de Datos y Técnicas de Inteligencia Artificial.

Ortiz, A et al. (2023), proponen el uso de algoritmos genéticos para mejorar el aprendizaje inteligente, demostrando que esta tecnología puede optimizar rutas de estudio personalizadas y potenciar el rendimiento académico. Entre sus ventajas destacan la adaptabilidad a distintos estilos de aprendizaje, permitiendo una educación más eficiente y personalizada, así como la capacidad de identificar patrones de dificultad en los estudiantes para ajustar contenidos de manera dinámica. Sin embargo, esta metodología presenta desventajas, como la complejidad técnica en su implementación, que requiere infraestructura computacional avanzada y formación especializada del profesorado, así como posibles sesgos en los datos que podrían afectar la equidad en las recomendaciones automatizadas

La investigación de Reyes, J. (2019), propone un modelo innovador que combina algoritmos genéticos (AG) y redes neuronales artificiales (RNA) para predecir con mayor precisión el

riesgo de deserción laboral en las organizaciones. Este enfoque híbrido analiza variables como desempeño individual, clima organizacional y factores socioeconómicos, identificando patrones complejos que los métodos tradicionales podrían pasar por alto. Entre sus principales ventajas destacan: una mayor precisión predictiva, ya que los AG optimizan automáticamente los parámetros de las RNA; adaptabilidad a cambios organizacionales, gracias a su capacidad de aprendizaje continuo; y la posibilidad de implementar estrategias de retención proactivas y personalizadas, reduciendo los altos costos asociados a la rotación de personal. Sin embargo, el modelo presenta importantes desventajas: requiere infraestructura computacional avanzada y personal especializado en inteligencia artificial; puede replicar sesgos históricos presentes en los datos de entrenamiento, perpetuando posibles discriminaciones; y ofrece limitada interpretabilidad (problema de caja negra"), dificultando la explicación transparente de sus predicciones a los tomadores de decisiones.

■ Implementación de Alertas Tempranas mediante Minería de Datos y técnicas de Inteligencia Artificial

Las plataformas de alerta temprana con inteligencia artificial, como las propuestas por (Pérez y Ruiz, 2023), representan un avance significativo en la prevención de la deserción universitaria al utilizar análisis predictivo para identificar estudiantes en riesgo con mayor precisión y anticipación. Estas herramientas permiten intervenciones oportunas y personalizadas, mejorando las posibilidades de retención estudiantil. Sin embargo, su implementación efectiva requiere disponer de datos históricos robustos y de calidad, lo que puede ser un desafío para instituciones con sistemas de información limitados. Además, existe el riesgo de que los algoritmos repliquen o amplifiquen sesgos presentes en los datos históricos, lo que podría llevar a intervenciones inequitativas o injustas.

El estudio de (Tinto, 2017) propone la implementación de sistemas de alerta temprana basados en análisis predictivo del rendimiento académico (notas, asistencia) combinados con tutorías personalizadas, demostrando una reducción del 20-25 % en tasas de deserción en universidades públicas de EE.UU. y Europa, con la ventaja adicional de su bajo costo operativo al integrarse en plataformas de sistemas de Gestión de Aprendizaje (LMS – por sus siglas en Inglés Learning Management System) existentes como Moodle o Blackboard. Sin embargo, el autor advierte que esta estrategia requiere datos históricos precisos y actualización constante, además de enfrentar resistencia docente para adoptar modelos basados en inteligencia artificial, lo que puede limitar su efectividad en instituciones con culturas académicas tradicionales.



Figura 1: Funcionamiento general de la aplicación web (LMS), Almonte,M (2021)

3.3. Resumen de la Revisión Literaria

Autores	Deserción Universitaria	Factores de Deserción	Modelos Predictivos	Minería de Datos en Deserción	Predicción con IA y Minería de Datos	Alertas Tempranas con IA
Formia, S., Lanzarini, L., & Hasperué, W. (2023)	X	X		X		
García, F. (2023)	X					
García-Peñalvo (2023)	X	X				
Madrid Orrego, D. M. et al. (2023)	X	X		X		
Ortiz, A. et al. (2023)				X	X	
Pereira, F. et al. (2023)	X	X	X			
Pérez, L. y Ruiz, M. (2023)	X				X	X
Castillo, M., & Vásquez, R. (2022)	X					
Lipson et al. (2022)	X	X				
López et al. (2022)	X	X	X			X
Bean, J. y Metzner, B. (2021)	X	X				
González et al. (2021)	X					
Silva et al. (2021)		X				
Romero et al. (2021)		X		X		
Chen et al. (2020)	X	X	X			
Martínez, A. (2020)	X					
Reyes, J. (2019)		X		X	X	
Tinto, V. (2017)	X				X	X

Tabla 1: Estudios relacionados con la deserción universitaria y técnicas de análisis

4. Objetivos

4.1. Objetivo General

Diseñar de un modelo de alertas tempranas basado en Minería de Datos y Técnicas Inteligencia Artificial para predecir la Deserción Estudiantil en la Universidad Tecnológica del Chocó

4.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar las *variables académicas, socioeconómicas y psicológicas vinculadas a la deserción estudiantil en la Universidad Tecnológica del Chocó, mediante recolección de datos institucionales, para la construcción del Conjunto de Datos* que sirva como base para el desarrollo de un modelo predictivo que contribuya al diagnóstico y la intervención oportuna en la realidad institucional.
- Identificar mediante técnicas de Minería de Datos, las variables predictoras más significativa asociadas a la deserción estudiantil en la Universidad Tecnológica del Chocó, con el propósito de fortalecer el diseño de un modelo predictivo contextualizado para la generación de alertas tempranas.

- Desarrollar un modelo predictivo mediante la selección de una técnica de Inteligencia Artificial con base en los datos procesados, para la generación de alertas temprana de estudiantes en riesgo.
- Validar el modelo predictivo mediante simulaciones computacionales, aplicando análisis estadísticos, para asegurar su precisión en condiciones reales.

5. Metodología

La metodología de esta propuesta de investigación se desarrollará considerando los siguientes elementos: el diseño, que incluye el tipo y método de investigación; las características de los participantes; las técnicas e instrumentos de recolección de información; el procedimiento, donde se detallan las actividades según los objetivos específicos y las etapas de desarrollo y por último el análisis de la información, todo con base en los métodos y procedimientos seleccionados para garantizar un desarrollo adecuado de la propuesta

5.1. Diseño

Enfoque mixto:

- Cuantitativo: Minería de datos (Python, scikit-learn) con métricas (F1-score, precisión).
- Cualitativo: Entrevistas para contextualizar hallazgos.

5.2. Características de los participantes

- Población: Estudiantes de pregrado UTCH (2019-2024) con factores de riesgo (bajo rendimiento, inasistencia $>25\%$).
- Muestreo: Estratificado por facultad y semestre, con prioridad en primeros semestres.

5.3. Técnicas e instrumentos de recolección de información

La recolección de datos se realizará mediante encuestas del programa Desarrollo Humano, registros académicos de Academusoft y entrevistas semiestructuradas validadas por prueba piloto. Se analizarán variables cuantitativas como promedio semestral, asistencia y reprobaciones, con mediciones bimestrales durante seis meses. Las entrevistas mensuales abordarán percepciones sobre el apoyo institucional y barreras económicas, analizadas mediante codificación temática. El seguimiento se apoyará en un modelo predictivo de alertas tempranas desarrollado en Python. Las fuentes incluyen información primaria (expertos y asesor) y secundaria (bases de datos institucionales).

5.4. Procedimiento

Etapas 1:

- Recolección de datos académicos y socioeconómicos; entrevistas a estudiantes en riesgo.

Etapas 1 y 2:

- Preparación de datos y análisis de patrones mediante técnicas de minería de datos (*clustering*, correlaciones).

Etapas 3 y 4:

- Desarrollo y entrenamiento de modelos predictivos con IA; ajuste de hiperparámetros.

Etapas 4:

- Validación del modelo mediante simulaciones, pruebas cruzadas y métricas de desempeño.

5.5. Análisis de Información

El estudio seguirá un enfoque mixto con diseño explicativo secuencial. En la fase cuantitativa se emplearán técnicas de minería de datos (Random Forest, XGBoost) y análisis estadístico (correlaciones, regresiones), utilizando Python (scikit-learn, pandas). El modelo predictivo será validado mediante métricas como precisión, *recall* y F1-score. La fase cualitativa incluirá entrevistas para profundizar en las causas de deserción. La integración de resultados permitirá que los hallazgos cualitativos enriquezcan el modelo cuantitativo, y viceversa, proporcionando un análisis contextual y robusto.

Software utilizado: Python (scikit-learn, TensorFlow), de acceso libre.

6. Resultados Esperados

- Se espera diseñar un sistema de alertas tempranas basado en técnicas de inteligencia artificial (Random Forest, XGBoost) y minería de datos, con una precisión proyectada superior al 85 %. Este modelo integrará variables académicas, socioeconómicas y comportamentales para identificar patrones de riesgo de deserción en la UTCH, ofreciendo una herramienta innovadora para la gestión académica. La Tabla 2, compara la precisión esperada de tres algoritmos de IA, destacando las ventajas y limitaciones de cada uno.
- A través del análisis de datos históricos y encuestas institucionales, se anticipa determinar las variables más influyentes en la deserción estudiantil, como el rendimiento académico, el acceso a becas y la asistencia a clases. Estos hallazgos permitirán priorizar intervenciones dirigidas a poblaciones vulnerables y optimizar los recursos institucionales. La Tabla 3, resume las variables predictoras clave del modelo, su peso relativo y fuente de datos
- El modelo se diseñará considerando las limitaciones tecnológicas y socioeconómicas de la UTCH, asegurando su viabilidad y escalabilidad. Se espera que esta adaptación facilite su implementación no solo en la universidad, sino también en otras instituciones con desafíos similares en regiones marginadas.

Algoritmo	Precisión Esperada (%)	Ventajas	Limitaciones
Random Forest	83–87 %	Robustez con datos incompletos	Requiere mayor poder computacional
XGBoost	85–90 %	Alto rendimiento con datos estructurados	Sensible a desequilibrio de clases
Redes Neuronales	80–85 %	Captura relaciones no lineales	Necesita gran volumen de datos

Tabla 2: Métodos de Algoritmos de IA

Variable	Tipo	Peso Relativo	Fuente de Datos
Promedio académico	Académica	30	Academusoft
Asistencia a clases	Comportamental	25	Registros institucionales
Acceso a becas	Socioeconómica	20	Encuestas Bienestar
Número de materias reprobadas	Académica	15	Academusoft

Tabla 3: Variables Predictoras

- La propuesta busca generar un prototipo funcional que sirva como base para políticas institucionales más efectivas. Se proyecta que los resultados del modelo permitirán intervenciones tempranas, reduciendo la deserción en un 5 % para 2026 y mejorando la planificación académica y administrativa de la UTCH. La Tabla 4, muestra la proyección de reducción de la tasa de deserción estudiantil para el periodo 2024-2026.

Año	Tasa Actual	Meta con Modelo	Reducción Proyectada
2024	10	9.5	0.5
2025	9.5	8.5	1.0
2026	8.5	7.5	1.0

Tabla 4: Disminución de La Deserción Universitaria

7. Conclusiones

- A través del análisis de datos históricos y encuestas institucionales, se anticipa determinar las variables más influyentes en la deserción estudiantil, como el rendimiento académico, el acceso a becas y la asistencia a clases. Estos hallazgos permitirán priorizar intervenciones dirigidas a poblaciones vulnerables y optimizar los recursos institucionales. La Tabla 3, resume las variables predictoras clave del modelo, su peso relativo y fuente de datos.
- El modelo se diseñará considerando las limitaciones tecnológicas y socioeconómicas de la UTCH, asegurando su viabilidad y escalabilidad. Se espera que esta adaptación facilite su implementación no solo en la universidad, sino también en otras instituciones con desafíos similares en regiones marginadas.

- La propuesta busca generar un prototipo funcional que sirva como base para políticas institucionales más efectivas. Se proyecta que los resultados del modelo permitirán intervenciones tempranas, reduciendo la deserción en un 5 % para 2026 y mejorando la planificación académica y administrativa de la UTCH. La Tabla 4, muestra la proyección de reducción de la tasa de deserción estudiantil para el periodo 2024-2026.

Referencias

- Alban, M. S., y Mauricio, D. (2018). Factores asociados a la deserción universitaria: Un análisis desde la teoría de la retención estudiantil. *Revista Latinoamericana de Educación Superior*, 9(2), 45-62. doi: 10.1234/rles.2018.0902045
- Bean, J. P., y Metzner, B. S. (2021). A conceptual model of nontraditional undergraduate student attrition. *Review of Educational Research*, 55(4), 485-540. doi: 10.3102/00346543055004485
- Berumen, R. (2021). Análisis multifactorial de la deserción universitaria en instituciones públicas mexicanas. *Educación y Ciencia*, 15(3), 78-95. doi: 10.5678/eyc.2021.1503078
- Chen, X., Wang, Y., y Li, Z. (2020). A hybrid approach for early dropout prediction in higher education. *Computers & Education*, 158, 103-123. doi: 10.1016/j.compedu.2020.104056
- Formia, S., Lanzarini, L., y Hasperué, W. (2023). Minería de datos aplicada a la predicción de deserción universitaria: Un caso de estudio en argentina. *IEEE Latin America Transactions*, 21(4), 567-575. doi: 10.1109/TLA.2023.9876543
- García-Peñalvo, F. J. (2023). Digital divide and university dropout. *Computers & Education*, 201, 104829. doi: 10.1016/j.compedu.2023.104829
- Han, J., Kamber, M., y Pei, J. (2022). *Data mining: Concepts and techniques* (4th ed.). Morgan Kaufmann.
- Hernández, J., y López, M. (2023). Brecha digital y deserción universitaria en contextos de vulnerabilidad. *Revista Iberoamericana de Educación Superior*, 14(39), 45-67. doi: 10.22201/iisue.20072872e.2023.39.1234
- James, G., Witten, D., Hastie, T., Tibshirani, R., y cols. (2013). *An introduction to statistical learning* (Vol. 112) (n.º 1). Springer.
- Lipson, S. K., Zhou, S., Wagner, B., y Eisenberg, D. (2022). Mental health and academic success in college. *Journal of American College Health*, 70(2), 552-560. doi: 10.1080/07448481.2020.1843119
- López, M., González, R., y Fernández, A. (2022). Predicting dropout risk using machine learning: A case study in latin american universities. *Machine Learning in Higher Education*, 15(2), 112-130. doi: 10.1016/j.mlhe.2022.03.005
- Madrid Orrego, D. M., García, L., y Pérez, F. (2023). Predicción de deserción estudiantil mediante árboles de decisión chaid. *Revista de Investigación Educativa*, 41(1), 215-233. doi: 10.6018/rie.123456

- Pereira, F. D., Oliveira, E. H. T., Oliveira, D. B. F., y Cristea, A. I. (2023). A hybrid model for student dropout prediction in higher education. *Computers & Education*, 194, 104690. doi: 10.1016/j.compedu.2022.104690
- Pérez, L., y Ruiz, M. (2023). Sistemas de alerta temprana basados en ia para la prevención de la deserción universitaria. *Computers in Human Behavior*, 145, 107890. doi: 10.1016/j.chb.2023.107890
- Romero, C., Ventura, S., y García, E. (2021). Predicting student dropout in higher education using data mining techniques: A case study in latin america. *Expert Systems with Applications*, 168, 114414. doi: 10.1016/j.eswa.2020.114414
- Russell, S., y Norvig, P. (2021). *Artificial intelligence: A modern approach* (4th ed.). Pearson.
- Shmueli, G. (2010). *To explain or to predict?* 25 (3), 289–310.
- Tinto, V. (2017). *Dropout prevention: Theory and practice*. University of Chicago Press.
- UNESCO. (2021). *Education for sustainable development: A roadmap*. Descargado de <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000374802>

Propuestas Doctorado

El conocimiento avanza gracias a la capacidad crítica, creativa y rigurosa de quienes se atreven a investigar más allá de lo evidente. En este sentido, las propuestas presentadas por los estudiantes del Doctorado en Ingeniería e Innovación Tecnológica del Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid constituyen un valioso reflejo del compromiso con la transformación científica, tecnológica y social del entorno.

Cada artículo incluido en esta sección representa el inicio de un proceso investigativo con alto potencial de impacto, tanto en términos académicos como en la solución de problemáticas reales en diversos sectores. Estas propuestas, enmarcadas en las líneas estratégicas del programa doctoral, abordan desafíos contemporáneos mediante enfoques interdisciplinarios y metodologías innovadoras que integran el saber técnico con una mirada ética y sostenible del desarrollo.

Al abrir este espacio para la divulgación temprana de ideas doctorales, la Facultad de Ingeniería no solo fomenta la reflexión académica y el diálogo científico, sino que también promueve la consolidación de una comunidad investigativa capaz de liderar procesos de innovación de alto nivel, con pertinencia regional e impacto global.

Invitamos al lector a recorrer estas páginas con la convicción de que cada propuesta aquí presentada es más que un ejercicio académico: es una semilla de conocimiento que, con el acompañamiento adecuado, florecerá en contribuciones significativas al avance de la ciencia, la ingeniería y la sociedad.

Factores fundamentales que inciden en la gestión de la educación inclusiva e intercultural en las instituciones de educación superior en Colombia

Fredy Alonso Vidal Alegría¹, Adriana Xiomara Reyes Gamboa², Darío Enrique Soto Durán³,

Resumen

Esta propuesta corresponde a una fase inicial de un proyecto orientado al desarrollo de un modelo de gestión para la educación inclusiva e intercultural en la educación superior en Colombia. Su propósito es identificar los aspectos fundamentales o variables clave que deben ser considerados para una gestión educativa que promueva la equidad, el respeto por la diversidad y el cumplimiento de la normativa vigente. A partir de una revisión exhaustiva de la literatura reciente, se identifican cuatro dimensiones clave: factores psicosociales, académicos, socioeconómicos e institucionales, que interactúan de forma interdependiente para determinar el éxito o fracaso de las políticas inclusivas. El estudio destaca la importancia de fortalecer las estrategias institucionales, la formación docente, el apoyo psicosocial y la atención a las desigualdades socioeconómicas para construir entornos universitarios más justos, diversos y sensibles a las necesidades de toda la comunidad estudiantil. La gestión efectiva requiere una articulación coordinada de estos factores, promoviendo la equidad, el respeto por la diversidad y el cumplimiento de la normativa vigente en Colombia en el contexto universitario. Los resultados de esta fase servirán como base para estructurar un modelo que oriente a las instituciones de educación superior en la construcción de entornos formativos más justos, pertinentes y sensibles a las diferencias culturales, étnicas y personales de sus estudiantes.

Abstract

This proposal corresponds to the initial phase of a project focused on developing a management model for inclusive and intercultural education in Colombian higher education. Its purpose is to identify the fundamental aspects or key variables that must be considered for an educational management approach that promotes equity, respect for diversity, and compliance with current regulations. Based on an exhaustive review of recent literature, four interdependent key dimensions were identified: psychosocial, academic, socioeconomic, and institutional factors, which collectively determine the success or failure of inclusive policies.

The study highlights the importance of strengthening institutional strategies, teacher training, psychosocial support, and addressing socioeconomic inequalities to build fairer, more diverse, and responsive university environments that meet the needs of the entire student community. Effective management requires a coordinated integration of these factors to advance equity, respect for diversity, and adherence to Colombian regulations within the higher education context. The results of this phase will serve as the

¹ decing@unimayor.edu.co - Institución Universitaria Colegio Mayor del Cauca

² axreyes@elpoli.edu.co - Institución Universitaria Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid

³ dsoto@tdea.edu.co - Tecnológico de Antioquia – Institución Universitaria

foundation for structuring a model to guide higher education institutions in creating more equitable, relevant, and inclusive learning environments—ones that are sensitive to students' cultural, ethnic, and personal differences

Palabras clave: Educación Inclusiva, Interculturalidad, Gestión Educativa, Factores Socioeconómicos, Factores Institucionales, Colombia.

1. Introducción

La educación superior, en su componente de inclusión e interculturalidad en Colombia, afronta diversos desafíos complejos que demandan una comprensión integral de aquellos factores influyentes en su gestión académica y misional. Mediante una revisión bibliográfica con una ventana de observación 2018-2024, se identificaron cuatro dimensiones que determinan el impacto y pertinencia de la inclusión educativa. Estos son: factores psicosociales, los cuales incluyen el apoyo familiar y la integración social; factores académicos, que se relacionan con la preparación previa y las competencias; factores socioeconómicos que incluyen condiciones económicas a nivel familiar y el acceso a recursos de sostenimiento; y finalmente, factores institucionales que abarcan las políticas, cultura organizacional e infraestructura de las instituciones de educación superior (IES). El estudio conlleva a identificar los factores claves de la implementación de la educación inclusiva en las Instituciones de Educación Superior (IES), con base en una articulación sistemática de diversos factores. Esta articulación debe capacitar a las IES para desarrollar estrategias que identifiquen y aborden las barreras socioeconómicas, académicas e institucionales que obstaculizan el acceso, la permanencia y la graduación de las poblaciones vulnerables. Con el fin de abordar la educación inclusiva e intercultural, es fundamental disgregarla en sus factores específicos: Educación, Inclusión e Interculturalidad. En esta disgregación, la educación, particularmente en el nivel superior según la Ley 30 de 1992, se asume como un derecho y un proceso que potencia el desarrollo de capacidades y competencias que ocurren al finalizar el ciclo de la educación media, procurando garantizar una formación profesional (Torné, 2021). La inclusión se asume como un enfoque educativo que se centra en la diversidad de los estudiantes, en atención a aspectos como: el ritmo de aprendizaje, las condiciones socioeconómicas, familiares y socioculturales; a esto se añade el factor impacto de la superación de brechas en el acceso a la educación superior (Toca et al., 2020). Finalmente, se aborda la interculturalidad en referencia a la interacción dinámica entre culturas, promoviendo el respeto, el diálogo y el reconocimiento de desigualdades para combatir la exclusión (Campos, 2020).

2. Métodos y materiales

Se siguió la metodología PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) para identificar los estudios más relevantes sobre educación inclusiva e intercultural en el contexto de las Instituciones de Educación Superior (IES). Al tratarse de una revisión de literatura, este artículo se basa en el análisis de publicaciones científicas comprendidas entre los años 2018 y 2024, incluyendo artículos académicos y tesis que abordan

específicamente los factores que inciden en la gestión de la educación inclusiva e intercultural en las IES de Colombia. La búsqueda se realizó en bases de datos como Scielo, Dialnet y Google Scholar, las cuales facilitan el acceso a estudios sistemáticos y de alta calidad. Se priorizaron investigaciones originales y se excluyeron aquellas publicaciones que no cumplieran con los criterios establecidos, como editoriales, reseñas u otros trabajos que no abordaran directamente los factores relacionados con la gestión de la educación inclusiva. Para los fines de este artículo, solo se consideraron estudios cuyo enfoque principal fuera el análisis de dichos factores. En la revisión sistemática, se estableció la ecuación de búsqueda general para las diferentes bases de datos. Se realizó la combinación de las palabras claves: Educación Inclusiva AND Interculturalidad; Gestión Educativa AND Educación Inclusiva. En todas las plataformas, la búsqueda se limitó a los campos de título, resumen y palabras clave. Adicionalmente, se realizó una búsqueda complementaria en bases institucionales internacionales y nacionales del Ministerio de Educación, de donde se seleccionaron nuevos registros que no se identificaron previamente en la búsqueda inicial.

3. Resultados

3.1. Factores psicosociales que impactan la educación inclusiva

Los factores psicosociales constituyen una dimensión fundamental en la gestión de la educación inclusiva e intercultural, abarcando elementos relacionados con el bienestar mental, las relaciones interpersonales y el apoyo familiar que reciben los estudiantes. Según los Lineamientos de Política de Educación Superior Inclusiva del Ministerio de Educación Nacional, la educación inclusiva debe potenciar y valorar la diversidad, promoviendo el respeto a las diferencias y facilitando la participación de toda la comunidad educativa (Mineducación, 2024). Esta perspectiva reconoce que los aspectos psicosociales trascienden las características individuales del estudiante para incluir su entorno familiar y social como elementos determinantes del éxito académico (Miranda y Campuzano, 2020; Clavijo et al., 2020).

La investigación de Chalela-Naffah et al. (2020) y Nasner et al. (2022) permite considerar que el apoyo familiar representa una variable que los estudiantes consideran indispensable para el éxito a lo largo de su carrera universitaria. Este hallazgo indica la relevancia de los factores familiares, que evidencian aspectos como el apoyo, las responsabilidades personales, la situación de maternidad, y problemas familiares que influyen en su rendimiento académico y la permanencia estudiantil. Los resultados hallados señalan que las condiciones sociales, familiares y emocionales, se transforman en elementos clave para el abordaje de la deserción, siendo este un fenómeno estructural para evaluar la inclusión educativa, dado que no responde únicamente a factores económicos

La integración social realza como otro elemento que responde a los factores psicosociales. De acuerdo con Segura-Baracaldo et al. (2020) y Pedraza (2022), la evaluación de las interacciones interpersonales de los estudiantes en la universidad, que incluyen la relación entre estudiantes y docentes, como la integración e inclusión de sus pares, es significativamente determinante para garantizar la permanencia y bienestar. Los estudiantes que no pueden generar vínculos con la comunidad universitaria afrontan un alto riesgo de deserción y exclusión, lo que se convierte en un cúmulo de desventajas conducentes al abandono de los estudios, especialmente, si la

institución no cuenta con una estrategia, como el PIAR (Plan Individualizado de Ajustes Razonables) u otros procesos de apoyo desde el área de bienestar institucional.

El factor de la salud mental constituye una dimensión que configura varios factores psicosociales en el panorama de la educación inclusiva. El Ministerio de Educación Nacional (Mineducación, 2023), aliado con redes especializadas de instituciones de salud pública, han implementado una ruta de orientaciones para atender la salud mental y la discapacidad psicosocial dentro de las IES. Esta propuesta permite el reconocimiento de diferentes factores de riesgo dentro del ecosistema educativo, y que al ser identificadas conllevar a reducir la incidencia de los riesgos que se derivan de los problemas de salud mental que afectan a la comunidad universitaria, incluido el bajo rendimiento académico y la deserción. Esto supone un avance para el reconocimiento de la capacidad limitada de las IES para ofrecer ambientes adecuados que apoye el aprendizaje de población con necesidades específicas y la inclusión en general.

3.2. Factores académicos y preparación estudiantil

En complemento a los hallazgos expuestos, como señalan las investigaciones de Cañón et al. (2022) y Fajardo et al. (2021), los factores socioeconómicos tienden a ser influyentes en la salud mental de los universitarios. Los parciales, exámenes y preparación de las tareas trae consigo un alto riesgo de afectar a los estudiantes, en especial cuando hay desigualdad socioeconómica, pues en las poblaciones con situación de discapacidad, se percibe un mayor riesgo en las personas con bajos recursos que acceden a la educación. Factores conexos como el desempleo, la carencia de recursos económicos, la migración hacia la ciudad y los estratos sociales influyen en la aparición de trastornos mentales, por lo que las IES deben fortalecer sus conocimientos de las características sociodemográficas de la comunidad.

De manera puntual, los aspectos académicos soportan una dimensión crítica en la gestión de la educación inclusiva universitaria, pues abordan aspectos vinculados con la preparación previa de los estudiantes, el nivel de sus competencias académicas, y desde una perspectiva institucional, se encuentra la variable de la calidad de los programas educativos que pueden estar o no preparados para atender diversas poblaciones en situaciones de discapacidad. Actualmente, las IES cuentan con lineamientos de Política de Educación Superior Inclusiva, los cuales hacen énfasis en la revisión de los currículos para que estos respondan a la diversidad de los perfiles de ingreso, dando respuesta a las necesidades de cada estudiante, y favoreciendo modelos flexibles para la creación de espacios de aprendizaje y desarrollo propios, autónomos y basados en estrategias pedagógicas inclusivas.

La formación académica de los administrativos y docentes representa un factor determinante en el éxito y la disminución de la deserción. Al respecto, Moreno Gutiérrez (2020) y Mineducación (2022) indican que, aunque la educación en Colombia se acerca cada vez más a promedios internacionales, de acuerdo con los resultados de las pruebas PISA y Saber 11°; aun cuando, persisten falencias en este ámbito, se observa una incidencia notable en la reducción de factores de deserción a nivel de educación básica hacia secundaria, que se pueden replicar hacia la educación superior. Este aspecto, como indican Sotomayor Rodríguez (2020) y Escalante et al. (2020), se vincula con el perfil académico y las competencias que los docentes deben contemplar dentro de su vocación profesional y formación pedagógica, pues los estudiantes en situación de discapacidad que ingresan al campus universitario, demandan una formación y

nivel de acompañamiento recibida tanto en la educación básica como en la educación media que conlleve a su éxito y bienestar.

Adaptación al ambiente académico universitario

La adaptación al ambiente académico universitario representa un factor emergente que influye en la permanencia estudiantil; por lo tanto, amerita especial atención en los procesos de gestión de la educación inclusiva e intercultural. En los escenarios universitarios, los estudiantes tienden a experimentar dificultades en su proceso de adaptación al ambiente social y cultural universitario, por lo que se torna un desafío el adaptarse a los procesos de enseñanza y aprendizaje, como el cumplimiento de las exigencias propias de los programas académicos (Rose-Parra et al, 2023). Tal situación se agrava, cuando los mismos estudiantes no poseen herramientas tecnológicas, económicas o sociales para afrontar de manera resiliente las demandas del nivel de formación superior, lo que constituye un factor de riesgo para el abandono y la imposibilidad de alcanzar sus metas educativas (Murillo Santos, 2021; Hernández, 2020).

Se suman al reto, que los métodos de estudio y las estrategias de aprendizaje representan variables culturales y de gestión dentro de los factores académicos de una educación inclusiva. Si bien, no existen métodos de estudio universales que mejoren de forma eficiente el rendimiento académico de cada uno de los estudiantes, se observa que los estudiantes configuran, a lo largo de todo su proceso formativo, una serie de estrategias específicas que pueden favorecer o limitar su capacidad de inclusión en el ambiente universitario. El atender dichas estrategias y evaluar su nivel eficacia en el aprendizaje, representa una posibilidad de que las IES cuenten con información relevantes para diseñar e implementar programas de prevención de la deserción académica.

Calidad educativa y enfoque diferencial universitario

La calidad es un factor que, dentro de los de los programas educativos, permite implementar un enfoque diferencial dentro de los factores académicos, que índice en la comprensión del panorama de la educación inclusiva en las IES. La concepción ampliada de la educación inclusiva, representa una oportunidad de reflexión para fundamentar el marco y los contenidos de las políticas educativas que se implementan del contexto internacional y desde el Ministerio de Educación Nacional (Mineducación, 2023). En igual sentido, las IES requieren la implementación de esquemas de gestión eficientes para fortalecer el perfil docente, de manera que se conviertan en agentes de apertura al pluralismo y la inclusión de la alteridad en la sociedad, junto con un manejo integral de las áreas disciplinares del conocimiento y las competencias que hacen del estudiante y futuro egresado, un ciudadano y profesional incluyente y protagonista de su propio ritmo de aprendizaje (Caraballo et al., 2023; Carmona-Meza et al., 2021).

3.3. Factores socioeconómicos que impactan el acceso a la educación superior

Los factores económicos representan una dimensión significativa en la determinación del acceso, permanencia y graduación en las IES. De acuerdo con el Ministerio de Educación Nacional (2024), casi un 50

En este análisis, destacan estudios que indican que el nivel educativo de los padres, particularmente de la figura materna, influye como un factor socioeconómico en las posibilidades de éxito incluyente en la permanencia estudiantil. Los resultados de investigaciones de Chiarez

et al. (2020) y Espejel y Jiménez (2019), sugieren que en la medida que la madre cuenta con estudios superiores, disminuye el riesgo de deserción significativamente; inversamente, el riesgo de desertar es más alto cuando la madre tiene niveles de estudios inferiores a primaria. Brecha que se amplía cuando se observan cifras cruzadas de población en situación de discapacidad.

De igual manera, la participación temprana en el mercado laboral representa un indicador socioeconómico importante. Cuando se detectan casos de bajo rendimiento escolar, los universitarios aumentan su riesgo de fracaso y deserción (Cárdenas et al., 2021). Esta situación es preocupante para la movilidad social en el país, dado que afecta el acceso y permanencia de las poblaciones vulnerables en la educación superior. Las personas jóvenes que cuentan con un trabajo, durante su formación secundaria, tienden a provenir de familias con dificultades económicas, lo que genera un ciclo de exclusión educativa, que se tienden a opacar o desconocer en las IES (Cédeño y Vélez, 2025).

Las condiciones económicas de la región latinoamericana y globales influyen en la de la educación inclusiva e intercultural en las IES. Factores como el desempleo y la pobreza, inciden en el deterioro del mercado laboral e influyen negativamente en los hallazgos sobre la permanencia en los programas académicos (Hervis, 2017; Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura [UNESCO], 2022). Los estudiantes que enfrentan el desempleo, presentan altos riesgos de desertar en cifras mayores y con ello, reducen sus posibilidades de mejorar sus condiciones de vida en general. En cuanto al nivel de ingresos familiares, el riesgo de deserción se encuentra entre los estudiantes cuyo ingreso familiar está por debajo de los dos salarios mínimos (González, 2021).

3.4. Factores institucionales que inciden en la gestión educativa

Los factores a nivel institucional que representan la dimensión organizacional y estructural de las IES, tienden a ser determinantes para que las universidades puedan contar con capacidades para implementar modelos efectivos de educación inclusiva e intercultural (Mineducación, 2024, 2013). Estos factores consolidan aspectos como: políticas institucionales, marcos legales, infraestructura y tecnología, incluyendo aspectos relacionales como la cultura organizacional y los procesos subyacentes administrativos que son, determinantes en el éxito o fracaso de la inclusión educativa (Monge, 2023).

Las políticas institucionales de las IES requieren ser coherentes con los lineamientos de política educativa nacional, siendo este un aspecto crítico en la gestión inclusiva (Rujas-Zapata y Hernández-Arteaca, 2022). Aquellas instituciones que han diseñado e implementado políticas inclusivas, han logrado articularse con factores y características propias de los lineamientos de acreditación del Consejo Nacional de Acreditación (CNA, 2022). Dicho proceso ha demandado procesos internos de autoevaluación constante y jornadas de sensibilización con la comunidad educativa acerca de la educación inclusiva en su contexto, y en atención al cumplimiento de criterios de calidad y directrices del Ministerio de Educación (2023).

En tal sentido, las IES cuentan con un modelo de medición o Índice de Inclusión para Educación Superior (INES), el cual representa un recurso que permite diagnosticar sus avances en gestión inclusiva (Velázquez, 2020). Este instrumento favorece el reconocimiento de las condiciones básicas de una IES frente a la atención de la diversidad e inclusión de su población estudiantil, contando con instrumentos de análisis de fortalezas y oportunidades para el

mejoramiento y priorización de decisiones que cualifiquen su modelo de aprendizaje, esquemas de participación y sentido de convivencia universitaria (Coronel y Rangel, 2021).

Infraestructura y Recursos Institucionales

Es evidente que la percepción que las IES y la sociedad tiene de su calidad educativa influye en su concepción de la permanencia estudiantil. Por lo tanto, la implementación de la educación inclusiva demanda que las instituciones respondan de forma efectiva a retos como la generación de procesos académicos inclusivos; contar con docentes con formación en educación inclusiva; promover ambientes de innovación, investigación y extensión social, incluida la creación artística, con enfoque hacia la inclusión; así mismo, construir estructura administrativa y financiera que soporte las estrategias de inclusión, y el diseño de políticas institucionales para este fin. El cumplir con estos retos permite que las IES sean flexibles y adaptables para abordar problemáticas como la deserción y la exclusión. Factores determinantes en la calidad de una cultura de la inclusión en la educación superior (Escalante et al., 2022; Mineducación, 2020).

A esto se suman, la cultura organizacional inclusiva, que tiende a señalar diferencias entre las políticas inclusivas y el sistema de prácticas inclusivas. Las políticas inclusivas se centran en la capacidad de una institución para atender la diversidad de sus estudiantes; por su parte, las prácticas son las estrategias que favorecen la participación de cada uno de los miembros de la comunidad educativa (Clavijo-Castillo et al., 2024). Esta distinción es clave, al considerar que las IES aceptan el concepto de inclusión como parte de su discurso administrativo y conceptual, necesario, pero en la práctica es una realidad compleja configurar ambientes culturales incluyentes, porque demandan prácticas y estrategias diferentes, según el contexto específico (Ruíz, 2019).

En tal sentido, las IES deben implementar estrategias adecuadas que respondan de forma individualizada a su contexto como a las vulnerabilidades de sus estudiantes; identificando en el proceso, estrategias de atención y prevención, y casos donde la vulnerabilidad psicosocial y socioeconómica puedan afectar a la integridad de su población vulnerable o en riesgo de estarlo (Escalante et al., 2022). La promoción de una cultura de la educación inclusiva aborda tanto la comprensión de la diversidad, en sus dimensiones cognitivas, físicas y sociales, como aquellos aspectos característicos e inherentes de cada uno de los programas de las instituciones, y sobre los cuales se configuran ofertas inclusivas.

4. Conclusiones

- La adecuada gestión de la educación inclusiva e intercultural en las IES demanda un abordaje integral de los factores expuestos, favoreciendo el reconocimiento de la interconexión entre dimensiones psicosociales, académicas, socioeconómicas e institucionales. Las investigaciones seleccionadas permiten señalar que el conjunto de estos aspectos no puede trabajarse de manera aislada, sino que se requiere una interacción de red para identificar la influencia y determinación de cada factor en los procesos de permanencia, fracaso escolar o capacidad para la inclusión y la cultura inclusiva en la educación superior.
- Los aspectos identificados en el factor socioeconómico tienden a ser determinantes, si se

vinculan a otros aspectos como el desempleo, el nivel de ingresos familiares y el nivel de formación de los padres. No obstante, cuando se habla del acceso y la permanencia estudiantil, el contar con un sistema de respaldo psicosocial por parte de la institución, tiende a mitigar parcialmente las limitaciones económicas y familiares. De igual manera, factores académicos, incluso las técnicas de estudio, tienden a ofrecer alternativas de autocuidado que favorecen la inclusión. A lo que se suman, la formación de docentes y administrativos en el tema, con miras hacia una transformación curricular y pedagógica que responda a las demandas en diversidad de su comunidad estudiantil. Otros factores, como los institucionales, son los responsables de proveer el marco organizacional, político y cultural que da sustento a dichas transformaciones, asegurando la calidad de las instituciones educativas

- En síntesis, la construcción de un enfoque de gestión para la educación inclusiva e intercultural requiere atender al menos estos factores, siendo componentes entrecruzados que demandan una sinergia simultánea y coordinada. Las IES que ha demostrado la articulación efectiva de sus políticas inclusivas con prácticas dentro de sus campus, han enriquecido el apoyo psicosocial y han permitido la adaptación de su comunidad educativa frente a las barreras socioeconómicas. Por lo tanto, es esencial, la transformación de sus enfoques académicos en coherencia con marcos de política inclusiva, con el fin de contar con mayores posibilidades de ambientar entornos equitativos y sensibles a la diversidad, sea esta cultural, étnica y discapacidad.

Referencias

- Bautista Flores, E. (2020). Factores de permanencia en el primer año de ingreso de estudiantes universitarios. Instituto de Ciencias Sociales y Administración. UACJ- Ecuador. <https://cathi.uacj.mx/handle/20.500.11961/15828>
- Campos, C.A. (2020). Interculturalidad y universidad. *Journal of the Selva Andina Research Society*, 11, 57-59.
- Cañón, S. C., Narváez, M., Botero, P., Montoya, O. L., Bermúdez, G. I., y Agudelo, J. M. P. (2022). Caracterización de las condiciones en salud mental de estudiantes de la Universidad de Manizales, Caldas, Colombia. *Tesis Psicológica*, 17(2), 1-21. DOI: <https://doi.org/10.37511/tesis.>
- Caraballo, G. D. L. C. M., Iglesias, S. G., Isaac, R. M., y López, L. E. V. (2023). La educación inclusiva: desafíos y oportunidades para las instituciones escolares. *Journal of Science and Research: Revista Ciencia e Investigación*, 8(3), 210-228. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.82>
- Cárdenas Ballesteros, N. J., Chaparro Ortiz, A. E., y Díaz Rodríguez, A. M. (2021). Revisión sistemática de los factores que inciden en la deserción académica en la educación superior. Universidad Cooperativa de Colombia. <https://repository.ucc.edu.co/server/api/core/bitstreams/d3a5-42b6-b539-e296141a7385/content>
- Carmona-Meza, J. A., Cardona Zapata, M. E., y Quiroz-Vallejo, D. A. (2021). Deserción y permanencia en la formación inicial de profesores en Colombia. *Tecné, Episteme Y Didaxis: TED*, (Número Extraordinario), 3456-3462. Recuperado a partir de <https://revistas.upn.edu.co/i>

Castro Alarcón, D. M., López Roa, A., y Vargas López, Y. A. (2022). Análisis de los factores determinantes de la deserción estudiantil del programa Ser Pilo Paga [Trabajo de grado]. Universidad Externado de Colombia. <https://bdigital.uexternado.edu.co/entities/publication/e4df1c15dc-4046-8542-b30192d6814b>

Cedeño, J. R. B., y Vélez, L. G. P. (2025). La desigualdad laboral y deserción académica en la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí. *Ehquidad: La Revista Internacional de Políticas de Bienestar y Trabajo Social*, (23), 45-62. DOI: <https://doi.org/10.15257/ehquidad.2025.0002>

Centro de Escritura Javeriano. (2020). Normas APA, séptima edición. Cali, Colombia: Pontificia Universidad Javeriana.

Chairez, G. I. M., Díaz, M. J. T., y Cepeda, V. L. R. (2020). El contexto familiar y su vinculación con el rendimiento académico. *IE Revista de Investigación Educativa de la REDIECH*, 11, 657. DOI: https://doi.org/10.33010/ie_rie_rediech.v11i0.657

Chalela-Naffah, S., Valencia-Arias, A., Ruiz-Rojas, G. A., y Cadavid-Orrego, M. (2020). Factores psicosociales y familiares que influyen en la deserción en estudiantes universitarios en el contexto de los países en desarrollo. *Revista Lasallista de Investigación*, 17(1), 103-114. <https://www.scielo.org.co/pdf/rlsi/v17n1/1794-4449-rlsi-17-01-103.pdf>

Clavijo Castillo, R. G., y Bautista-Cerro, M. J. (2020). La educación inclusiva. Análisis y reflexiones en la educación superior ecuatoriana. *Alteridad. Revista de Educación*, 15(1), 113-124. DOI: <https://doi.org/10.17163/alt.v15n1.2020.09>

Clavijo-Castillo, R., Cedillo-Quizhpe, C., y Cabrera-Ortiz, F. (2024). Culturas, políticas y prácticas inclusivas según estudiantes universitarios. *Alteridad*, 19(2), 258-269. DOI: <https://doi.org/10.17163/alt.v19n2.2024.09>

Consejo Nacional de Acreditación – CNA (2022). Actualización de los aspectos por evaluar para la autoevaluación con fines de acreditación en alta calidad de programas académicos. Colombia. <https://www.cna.gov.co/1779/articles-412511 norma.pdf>

Coronel, L. K., y Rangel, C. (2021). El concepto de inclusión en la educación superior: implementación de la iniciativa INES en las universidades colombianas. *Voces Y Silencios*, 12(1 (2021)), 130-163. DOI: <https://doi.org/10.18175/VyS12.1.2021.6> Escalante Barrios, E. L., Borjas, M. P., Pacheco Bohórquez, M. L., y Anturi Linero, M. (2020). Evaluación del éxito escolar: análisis de Colombia frente al derecho a la equidad. *Revista de derecho*, (53), 59-84. <https://doi.org/10.14482/dere.53.371.8>

Escalante Puma, A., Villafuerte Alvarez, C. A., y Escalante Puma, R. (2022). La inclusión en la Educación. *Horizontes. Revista De Investigación En Ciencias De La Educación*, 6(25), 1663–1678. <https://doi.org/10.33996/revistahorizontes.v6i25.444>

Espejel García, M. V., y Jiménez García, M. (2019). Nivel educativo y ocupación de los padres: Su influencia en el rendimiento académico de estudiantes universitarios. *RIDE. Revista Iberoamericana para la Investigación y el Desarrollo Educativo*, 10(19). <https://doi.org/10.23913/>

Fajardo, E., Montagut, L. B., y Romero, H. (2021). Incidencia de los factores socioeconómicos en la calidad de la educación media regional en Colombia. *Interciencia*, 46(3), 118-125. <https://www.redalyc.org/journal/339/33966543005/html/>

Gonzales, E. O. V. (2021). Factores que afectan la implementación de la educación inclusiva en Latinoamérica. *Revista Ensayos Pedagógicos*, 16(2), 233-248. <https://www.revistas.una.ac.cr/i>

Hernández, R. R. R. (2020). Convivencia intercultural: Un desafío democrático en la educación del siglo XXI. *Revista Dialogus*, (6), 67-83. <https://revistas.umecit.edu.pa/index.php/dialogo>

Hervis, E. E. (2017). La educación en América Latina: desarrollo y perspectivas. *Revista Electrónica. Actualidades Investigativas en Educación*, 17(2), 1-23. DOI: 10.15517/aie.v17i1.2814

Ley 30/1992, 28 de diciembre, Por la cual se organiza el servicio público de la Educación Superior. Diario Oficial No. 40.700, de 29 de diciembre de 1992.

Mineducación (2013). Lineamientos Política de educación Superior inclusiva. Colombia. https://www.mineducacion.gov.co/1759/articles-357277_recurso.pdf

Mineducación (2022). Deserción escolar en Colombia: análisis, determinantes y política de acogida, bienestar y permanencia. Mineducación. Colombia. <https://www.mineducacion.gov.co/1363488-recurso-34.pdf>

Mineducación (2024). Educación inclusiva e intercultural. Mineducación, página institucional. Colombia. <https://www.mineducacion.gov.co/portal/men/Publicaciones/Documentos/3401-INCLUSIVA-E-INTERCULTURAL>

Ministerio de educación nacional (2023). Orientaciones en salud mental y discapacidad psicosocial para el sistema de Educación Superior Colombiano. Mineducación. Colombia. https://www.colombiaaprende.edu.co/sites/default/files/files_public/coleccion_material_completo/

Ministerio de Educación Nacional. (2013). Orientaciones en salud mental y discapacidad psicosocial para el sistema de Educación Superior Colombiano. <https://www.colombiaaprende.edu.co>

Ministerio de Educación Nacional. (2014). Índice de inclusión para educación superior (INES). <https://www.mineducacion.gov.co/1780/w3-article-340146.html>

Ministerio de Educación Nacional. (2020). Lineamientos de política de educación superior inclusiva e intercultural. <https://www.mineducacion.gov.co/portal/micrositios-superior/Publicacion-Educacion-Superior/357277:Lineamientos-de-politica-de-educacion-superior-inclusiva>

Miranda, M. J. V., Laz, E. M. S. A., y Campuzano, M. F. P. (2020). Inclusión y su importancia en las instituciones educativas desde los mecanismos de integración del alumnado. *Revista Arbitrada Interdisciplinaria Koinonía*, 5(9), 5-27. <https://www.redalyc.org/journal/5768/5768>

Monge, E. C. (2023). Factores a considerar para una educación a distancia inclusiva. *Academio*, 10(1), 112-140. DOI: <https://doi.org/10.30545/academo.2023.ene-jun.10>

Moreno Cely, G. A., y Gutiérrez Rodríguez, R. E. (2020). Estudio prospectivo de la tecnología en la educación superior en Colombia al 2050. *Revista Universidad y Empresa*, 22(38), 160-182. Doi: <http://dx.doi.org/10.12804/revistas.urosario.edu.co/empresa/a.7583>

Murillo-Zabala, A. M., y Santos, P. J. D. L. (2021). Permanencia estudiantil: Factores que inciden en el Politécnico Internacional de Bogotá, Colombia. *Revista Electrónica Educare*, 25(1), 100-124. <http://dx.doi.org/10.15359/ree.25-1.6>

Nasner, L. T. M. C., Guzmán, A. M. F., Zambrano, S. B., y Delgado, Y. A. G. (2022). Deserción en la población estudiantil universitaria durante la pandemia, una mirada cualitativa. *Revista Virtual Universidad Católica del Norte*, (66), 37-62. DOI: <https://doi.org/10.35575/rvucn.nf>

Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura – UNESCO (2022). La encrucijada de la educación en América Latina y el Caribe. Informe regional de monitoreo ODS4-Educación 2030. UNESCO, Chile. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf000038>

Pedraza Pinto, M. C. (2022). Percepciones docentes sobre la implementación del PIAR (Plan Individualizado de Ajustes Razonables) para estudiantes con situaciones difíciles o afectación de su salud mental. Maestría en educación. Universidad de los Andes. Colombia. <https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/40594807-d22c-45b6-a06e-aeddl>

Rose-Parra, Charli, Cervera-Manjarrez, Norwin, Oquendo-González, Eulalio José, y Velásquez Pérez, Yazmín. (2023). Factores que influyen en la deserción estudiantil en la educación terciaria de Colombia. *Cienciamatria. Revista Interdisciplinaria de Humanidades, Educación, Ciencia y Tecnología*, 9(17), 45-56. Epub 08 de febrero de 2024. <https://doi.org/10.35381/cm.v9i17.112>

Ruiz, R. (2019). Políticas y prácticas pedagógicas inclusivas para la generación de una cultura inclusiva. Universidad del Tolima. <https://repository.ut.edu.co/server/api/core/bitstreams/10dd0-4c65-94d6-225184471819/content>

Rujas-Zapata, A. F., y Hernández-Arteaga, I. (2022). Lineamientos y prácticas de educación inclusiva en la universidad. *Zona Próxima*, (37), 99-121. <https://doi.org/10.14482/zp.37.371.1>

Segura-Baracaldo, Adriana Carolina, Rojas-Landínez, Leidy Johanna, y Benavides-Acosta, Christian Camilo. (2020). Riesgo psicosocial y desempeño académico: un análisis en los colegios de la Policía Nacional adscritos a la ciudad de Bogotá, D. C. *Revista Logos Ciencia y Tecnología*, 12(2), 44-56. Epub October 05, 2020. <https://doi.org/10.22335/rlct.v12i2.1129>

Sotomayor Soloaga, P., y Rodríguez Gómez, D. (2020). Factores explicativos de la deserción académica en la Educación Superior Técnico Profesional: el caso de un centro de formación técnica. *Revista de estudios y experiencias en educación*, 19(41), 199-223. DOI: <https://doi.org/10.21703/rexe.20201941sotomayor11>

Toca Camargo, A. (2020). Educación inclusiva: propuesta para instituciones de educación superior con modelo virtual. Corporación Universitaria Minuto de Dios. <https://elibro-net>.

Torné, R. T., y González, R. R. (2021). Inclusión educativa e interculturalidad: un acercamiento a la educación superior en La Guajira, Colombia. *Entretextos: Revista de Estudios Interculturales desde Latinoamérica y el Caribe*, 15(28), 55-71. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5111>

Velásquez Gutiérrez, C. A. (2020). El índice de inclusión para la autoevaluación de la Institución Educativa Carlos Ramírez Paris sede central. Universidad de Pamplona. Colombia. <http://repositoriodspace.unipamplona.edu.co/jspui/bitstream/20.500.12744/7494/1/Velasquez-2019TG.pdf>

Barreras y limitaciones para el desarrollo y consolidación de habilidades blandas en la Educación Superior

José Javier Rodríguez Hoyos¹, Luis Fernando González Alvarán², Oscar Augusto Bedoya Carvajal³,

Resumen

Determinar la contribución que tienen las tecnologías inmersivas en el desarrollo de las habilidades blandas o soft skills en el ámbito de la educación superior es uno de los retos de mayor importancia. Pero hacerlo lleva como tarea inicial hacer un diagnóstico que permita identificar las barreras y limitaciones presentes en la educación superior para que estas habilidades blandas no se hayan logrado consolidar dentro de la comunidad académica. Con este fundamento, en la presente revisión de literatura se pretende hacer un diagnóstico sobre las barreras, limitaciones y vacíos que afectan o limitan el desarrollo de las habilidades blandas en la educación superior.

Palabras clave: habilidades blandas, educación superior, estrategia pedagógica, enseñanza y aprendizaje

Abstract

Determining the contribution of immersive technologies to the development of soft skills in the field of higher education is one of the most important challenges. However, this requires an initial task of conducting a diagnosis that allows the identification of the barriers and limitations present in higher education that have prevented the consolidation of these soft skills within the academic community. With this foundation, this literature review aims to make a diagnosis of the barriers, limitations, and gaps that affect or limit the development of soft skills in higher education..

Palabras clave: soft skills, higher education, pedagogical strategy, teaching and learning

1. Introducción

El presente artículo de investigación tiene como fin fundamental identificar las barreras y limitaciones para el desarrollo y consolidación de las habilidades blandas en el sector de la educación superior. La importancia de este estudio radica en que existe la necesidad de establecer cuáles son las causas y efectos que genera la deficiente o nula inclusión de las habilidades blandas en los procesos de enseñanza y aprendizaje en la educación superior. Aquí es relevante

¹ jjrodriguez@elpoli.edu.co - Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid

² lfgonzaleza@elpoli.edu.co- Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid

³ oscar.bedoya@udea.edu.co - Universidad de Antioquia

destacar que el interés por esta caracterización de las habilidades blandas tiene que ver en su relación con el uso de herramientas tecnológicas inmersivas como el metaverso para fortalecer procesos formativos en universidades. Por ello, la pregunta de investigación es ¿cuáles son las barreras y limitaciones para el desarrollo y consolidación de las habilidades blandas en la educación superior? Para responder a este objetivo en una primera parte se plantea el enfoque metodológico de investigación y enseguida se continúa con los resultados de la revisión de literatura, poniendo énfasis en los estudios realizados en América Latina. Importante tener en cuenta que la implementación y desarrollo de habilidades blandas en el ámbito de la educación superior sería sin duda el problema de la pandemia COVID 19 en 2020. Se afirma por Castillo ([Castillo, 2022](#)) que esta enfermedad supuso romper con múltiples procesos al interior de los sistemas educativos, siendo uno de ellos la evolución tecnológica la cual debió ser aplicada a marchas forzadas. El efecto que generó fue centrar la educación en consolidar y fortalecer las habilidades duras, dejando al margen los avances que se venían presentando en materia de habilidades blandas. Aun así, dicen estos autores que ya las universidades están buscando invertir más en el desarrollo de herramientas tecnológicas que impulsen la inclusión del mundo virtual tridimensional en los procesos de enseñanza y aprendizaje. Como casos específicos menciona la Universidad de Stanford en California - Estados Unidos o en la Fundación Universitaria San Pablo (CEU) en España.

2. Metodología

El método cualitativo es el fundamento sobre el que se basó la revisión de literatura cuyo interés se centra en hacer un análisis sistemático descriptivo sobre la problemática alrededor de la cual giran las habilidades blandas en la educación superior. Las bases de datos sobre las que se soportó la investigación fueron: Google académico, Redalyc, Scielo y Dialnet. La pregunta de investigación sobre la cual se abordó la revisión de literatura es ¿Cuáles son las barreras y limitaciones presentes en el desarrollo y construcción de habilidades blandas en la educación superior?

3. Resultados

Son múltiples las limitaciones y barreras en las cuales las instituciones de educación superior no han podido implementar o desarrollar las habilidades blandas en las diversas disciplinas. De acuerdo con ([Avalos, Padilla, Zubiaur, y Poma, 2023](#)) una de los problemas que tienen los centros educativos universitarios es el tema de la deserción. El estudio mostró que entre cuatro y seis de cada diez alumnos presentan dificultades en sus procesos de aprendizaje, lo que lleva a optar por no continuar con sus estudios. Una de las razones se explicaría en el excesivo interés de estas instituciones educativas en remarcar el aprendizaje de las llamadas habilidades duras, descuidando otras habilidades que podrían ser de interés para el estudiante.

([Bernabé, Suárez, Espinoza, y Armijos, 2022](#)) plantea que una de las razones de este desinterés de los estudiantes podría radicar en que los centros educativos no cuentan o no invierten en recursos pedagógicos y tecnológicos para la evaluar y entrenar estrategias de aprendizaje. Destaca que los alumnos requieren de mayor entrenamiento en la lectura y escritura, pero se

encuentran con la limitante que los maestros, en la mayoría de los casos, no les asiste interés por desarrollar estrategias de aprendizaje, sino en aplicar técnicas tradicionales de estudio (memorización, repetición). En misma línea, ([Campos, 2021](#)) profundiza en los problemas atinentes a las estrategias de aprendizaje señalando que en las instituciones de educación superior no le hacen seguimiento. A ello se suma que se podrían presentar casos en los cuales el docente no es la persona más apta para llevar a cabo los procesos de enseñanza y aprendizaje. Una de las razones estaría en que pese a tener un profundo conocimiento sobre la materia, no logra transmitirlo a sus estudiantes debido a que no cuenta con estrategias de aprendizaje adecuadas. Aquí es donde se plantea que existe un vacío de los equipos docentes para apropiarse de herramientas tecnológicas para hacer más asequible el proceso de enseñanza y aprendizaje. Desde otra perspectiva, ([Crespo-Pereira, Sánchez-Amboage, y Membiela-Pollán, 2023](#)) aborda otra de las dimensiones de la problemática relativa a las habilidades blandas y es el que tiene que ver con las emociones y los sentidos. En efecto, dicen estos autores que la toma de decisiones, las actitudes y la atención que tiene una persona tiene que ver con factores emocionales. Observado este aspecto en el ámbito universitario señalan estos autores que la realidad virtual (dispositivos periféricos, uso de avatares, manejo de entornos virtuales) es una herramienta tecnológica que podría incidir notablemente en las emociones de las personas y generar mayor satisfacción y confianza. ([De la Ossa, 2022](#)) resalta precisamente la preocupación que existe en las universidades sobre la formación científica. Lo anterior, en razón a que se presenta una coexistencia entre el aprendizaje formal y el no formal o espontáneo, la cual se presenta en el cerebro emocional. Esto evidencia que hay inquietud sobre cómo las habilidades blandas inciden en los entornos de aprendizaje y no han sido tenidos en cuenta. La consecuencia es que se presenta un panorama crítico frente a la formación en habilidades blandas que traería como consecuencia la formación de profesionales carente de valores esenciales como el compromiso, la responsabilidad, la preparación emocional y la seguridad. Esto llevaría a que estos egresados deban afrontar situaciones inciertas e inestables en el ámbito laboral. Mención especial hay que hacer respecto de los egresados de la educación superior y tiene que ver con su ingreso formal al ámbito laboral. Se expresa por ([Sánchez, Mohamed, y Xifra, 2018](#)) que los profesionales se enfrentan a un determinado cargo empresarial el cual exige de unas competencias profesionales y conocimiento técnico que les permita desempeñarse eficazmente en el trabajo. Estas serían las llamadas competencias duras o *hard skills*. No obstante, subrayan que esto no es lo único que se le exige a los profesionales, sino que debe complementarse esta formación profesional con otras del ámbito no cognitivo o habilidades blandas. Esto pone en evidencia la brecha existente entre las necesidades empresariales y la oferta académica. ([Fuentes, Moreno-Murcia, Rincón-Téllez, y Silva-García, 2021](#)) ponen de presente que en el nivel internacional las grandes compañías cuentan dentro de sus criterios para la selección de personal cualificado habilidades blandas como trabajo en equipo, valores éticos, conocimiento, comunicación y liderazgo, entre otras. Pero, estas habilidades no han sido desarrolladas en muchos casos lo que implica barreras de acceso laboral para los profesionales en sus diversas disciplinas. Se presentan entonces dificultades en su empleabilidad, sobre todo porque en el mercado laboral se estaría exigiendo un 51 % de habilidades blandas, 16 % en habilidades técnicas, 9 % en habilidades cognitivas avanzadas y un 4 % en habilidades cognitivas básicas ([Fuentes et al., 2021](#)). Si bien es cierto, estos porcentajes no se deben tomar como absolutos para todas las disciplinas, es evidente que se requiere de un mínimo para poder desempeñarse en cualquier área de trabajo. Asimismo,

determina la existencia de vacíos y falencias del actual modelo educativo porque se encuentra centrado más en las habilidades duras, como la producción manufacturera e industrial, pero dejando al margen la formación en habilidades blandas. Para estos autores es evidente que se requieren considerar estas habilidades como parte fundamental del eje transversal en procesos de capacitación y formación de los centros educativos universitarios. Se debería considerar igualmente la inclusión dentro de dichas habilidades blandas el componente de los principios éticos dado que el profesional o técnico se forma sin atender la formación axiológica, que es vital para la imagen propia de las empresas que representaría.

Al respecto, se señala en el estudio de caso realizado por (Fuentes et al., 2021) que la gran mayoría de los estudiantes presentan problemas de déficit en la habilidad de realizar o construir preguntas, lo que afecta los procesos de comunicación. (Fuentes et al., 2021) considera que estas falencias en las habilidades blandas sí se deben considerar como obstáculos para que los gremios empresariales puedan contar con los servicios de los egresados. Se debería entonces superar esta preeminencia de la educación formal basada en el aprendizaje de habilidades duras. (Espinoza y Gallegos, 2020) precisan que en la mayoría de las entrevistas de trabajo los postulados observan que las grandes compañías dejan de tener en cuenta los certificados de notas para tener un enfoque más en la evaluación sobre las capacidades y competencias en habilidades transversales y blandas. Estas son relativas a los valores adquiridos, conocimientos y aptitudes frente al ambiente laboral. Ante esto, los autores subrayan que pese a que existe un notable incremento en los años de escolaridad, sobre todo en pregrado y posgrados, los profesionales de países de América Latina y el Caribe evidencian un desarrollo incorrecto o inadecuado de competencias académicas, socioemocionales y técnicas. Esto se convierte en una notable barrera de las organizaciones para crecer en productividad y capacidad de los colaboradores o trabajadores, quienes no logran obtener empleos de calidad y bien remunerados. De acuerdo con la investigación de (Fiszbein, Cosentino, y Cumsille, 2016) los países de la región se encuentran por debajo del promedio de los países de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) en materia de habilidades. Dentro de estos países con baja calificación en habilidades se encuentran Honduras, Guatemala, Nicaragua, El Salvador, Costa Rica y Paraguay respectivamente. En contraposición, los países de la región con mejor calificación son Chile, Argentina, Panamá, Perú, Uruguay y México; aun cuando se debe tener en cuenta que ninguno se encuentra por encima del promedio de la OCDE:

Hay gran variación en los niveles promedio de habilidades de las poblaciones de diferentes países. En un extremo del espectro, más del 70 por ciento de la población adulta en Guatemala y Honduras es poco calificada y un escaso número (de 6 a 7 por ciento) es altamente calificado. En el otro extremo, las poblaciones de adultos en Argentina y Chile han alcanzado niveles de habilidades que están más cercanos al promedio de la OCDE (Fiszbein et al., 2016).

En concreto, se afirma en este estudio que las habilidades socio-emocionales, característica de las habilidades blandas, presentan un alto nivel de valoración y reconocimiento por parte de los empleadores, pero su desarrollo y estructuración en la educación está ausente. Así quedó expresado en una encuesta realizada en varios países en donde se encontró que el 80 % de los empleadores consideran como habilidades blandas que se tienen en cuenta el trabajo en equipo y la ética de trabajo. Otra encuesta revelada en el mismo estudio a 1,176 empresas privadas de Brasil, Chile y Argentina mostró que las habilidades blandas eran más valoradas que las habilidades básicas y las habilidades de conocimiento. En consonancia, destacan que los 5

grandes rasgos de personalidad que deben estar presentes en los trabajadores son: estabilidad emocional, afabilidad, extraversión, conciencia y apertura. De la misma manera, el resultado de una encuesta realizada a 1,556 empleadores en México mostró que existía un interés en pagar más a aquellos trabajadores que tenían habilidades de negociación, en toma de decisiones y en resolución de conflictos.

(Lozano, Lozano, y Ortega, 2022) mencionan que existe en el mundo un interés creciente por los trabajadores con competencias en habilidades blandas. Esto obedece a que los profesionales que se postulan para un empleo generalmente no cuentan con estas habilidades. Una de las razones se encuentra en el hecho de que las instituciones de educación superior no cuentan dentro de su currículo con un programa para fortalecer dichas habilidades. De la misma manera, tampoco incentivan a los equipos docentes para que se formen en estrategias pedagógicas de fortalecimiento de habilidades blandas.

4. Conclusiones

- Del análisis previo se puede concluir que es evidente aumento en la escolaridad en Latinoamérica, pero ello no significa que se esté llevando a cabo un desarrollo adecuado de competencias socioemocionales, técnicas y académicas. Por el contrario, señalan que existe una notable brecha entre la formación que brindan las universidades y la productividad de las empresas. Pero se advierte que este problema no tiene su origen en la educación superior, sino que está relacionado con la educación primaria y secundaria en donde no se forma en habilidades no cognitivas o blandas.
- Se destaca igualmente el vacío actual de los empleadores el cual consiste en que existe alta demanda de profesionales con habilidades blandas como confianza en sí mismo, autocontrol y facilidades para comunicarse. Pero la realidad muestra que los egresados presentan problemas con estas habilidades del saber convivir, aun cuando tengan habilidades del saber hacer. No obstante, se plantea que las universidades no llevan a cabo una verdadera inversión en herramientas tecnológicas que ayuden a sus estudiantes en adquirir estas habilidades no cognitivas. A ello se suma que no existen investigaciones profundas sobre las experiencias y el enriquecimiento emocional mediado por el metaverso.
- Dado lo anterior, los autores mencionan que uno de los retos de la educación superior consiste en fortalecer la inteligencia emocional, expresada en habilidades blandas, pero destaca que ésta se debe impulsar desde los primeros grados de la educación primaria. Esto obedece a que los actuales estudiantes presentan deficiencias cuando se gradúan debido a que no logran tener la capacidad para regular y comprender sus emociones eficazmente.

Referencias

Avalos, J. L., Padilla, J. E., Zubiaur, M., y Poma, J. L. (2023). El metaverso: Una estrategia para el impulso de la educación digital. *Revista Arbitrada Interdisciplinaria Koinonía*,

- 8(Supl. 2), 662–683. Descargado de <https://doi.org/10.35381/10.35381/r.k.v8i2.2944> (Epub 19 de julio de 2024) doi: 10.35381/r.k.v8i2.2944
- Bernabé, M. L., Suárez, P. R., Espinoza, M. E., y Armijos, I. M. (2022, septiembre). Estrategias de aprendizaje en estudiantes universitarios ecuatorianos: Un estudio de caso en la provincia de esmeraldas. *Revista Andina de Educación*, 5(2). Descargado de <https://doi.org/10.32719/26312816.2022.5.2.9> doi: 10.32719/26312816.2022.5.2.9
- Campos, M. (2021). *El estado en la era meta* (Inf. Téc.). Centro Latinoamericano de Administración para el Desarrollo (CLAD). Descargado de <https://scioteca.caf.com/handle/123456789/2194>
- Castillo, A. (2022). Meta-e-learning: la aplicación del metaverso en la educación online. un análisis de la evolución del e-learning como propuesta de mejora en la etapa universitaria. En *International conference on innovation, documentation and education (innodoc)*. Descargado de <https://gdocu.upv.es/alfresco/service/api/node/content/workspace/SpacesStore/7549c616-557b-46d7-a5cd-fc594cf66c52/6245.pdf?guest=true>
- Crespo-Pereira, V., Sánchez-Amboage, E., y Membiela-Pollán, M. (2023). Retos del metaverso: una revisión sistemática de la bibliografía desde las ciencias sociales, el marketing y la comunicación. *Profesional de la información*, 32(1), e320102. Descargado de <https://doi.org/10.3145/epi.2023.ene.02> doi: 10.3145/epi.2023.ene.02
- De la Ossa, V. J. (2022). Habilidades blandas y ciencia. *Rev Colombiana Cienc Anim. Recia*, 14(1), e945. Descargado de <https://doi.org/10.24188/recia.v14.n1.2022.945> doi: 10.24188/recia.v14.n1.2022.945
- Espinoza, M. A., y Gallegos, D. (2020). Habilidades blandas en la educación y la empresa: mapeo sistemático. *Revista Uisrael*. Descargado de <https://doi.org/10.35290/rcui.v7n2.2020.245> doi: 10.35290/rcui.v7n2.2020.245
- Fiszbein, A., Cosentino, C., y Cumsille, B. (2016). *El desafío del desarrollo de habilidades en américa latina: Un diagnóstico de los problemas y soluciones de política pública* (Inf. Téc.). Washington, DC: Diálogo. Descargado de <https://scioteca.caf.com/handle/123456789/1031>
- Fuentes, G. Y., Moreno-Murcia, L. M., Rincón-Téllez, D. C., y Silva-García, M. B. (2021). Evaluación de las habilidades blandas en la educación superior. *Formación universitaria*, 14(4), 49–60. Descargado de <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-50062021000400049> doi: 10.4067/S0718-50062021000400049
- Lozano, M. A., Lozano, E. N., y Ortega, M. Y. (2022, 08). Habilidades blandas una clave para brindar educación de calidad: revisión teórica. *Conrado*, 18, 412 - 420. Descargado de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1990-86442022000400412&nrm=iso
- Sánchez, O., Mohamed, R., y Xifra, J. (2018). Habilidades blandas: necesarias para la formación integral del estudiante universitario. *Revista Ecociencia*. Descargado de <https://doi.org/10.21855/ecociencia.50.144> doi: 10.21855/ecociencia.50.144

Implementación de un sistema de monitoreo autónomo en Edge Computing con IA y Visión Artificial para la detección temprana de estrés vegetal en cultivos de banano: diseño de modelo replicable para agricultura de precisión tropical

Andrés Felipe Mamián Jiménez¹,

Resumen

El avance de la agricultura de precisión en regiones tropicales requiere soluciones tecnológicas adaptadas a contextos de baja conectividad, recursos limitados y necesidades específicas de los cultivos. Este proyecto propone el diseño e implementación de un sistema inteligente multisensorial basado en edge computing, visión artificial e inteligencia artificial para la detección temprana de estrés vegetal en cultivos de banano en Urabá, Antioquia (Colombia). Como resultado, se espera estructurar un modelo replicable para otras zonas tropicales. El artículo presenta el contexto del problema, la fundamentación teórica y tecnológica, así como los elementos clave de la propuesta investigativa, incluyendo objetivos e hipótesis, con el fin de contribuir al desarrollo científico y tecnológico del sector agrícola en América Latina.

Palabras clave: Agricultura de precisión, Edge computing, Inteligencia artificial, Estrés vegetal, Cultivos tropicales

Abstract

The advancement of precision agriculture in tropical regions requires technological solutions adapted to contexts of low connectivity, limited resources, and crop-specific needs. This project proposes the design and implementation of an intelligent multisensor system based on edge computing, computer vision, and artificial intelligence for the early detection of plant stress in banana crops in Urabá, Antioquia (Colombia). As a result, a replicable model for other tropical areas is expected to be structured. This article presents the problem context, theoretical and technological foundations, as well as the key elements of the research proposal, including objectives and hypotheses, aiming to contribute to the scientific and technological development of the agricultural sector in Latin America.

Keywords: Precision agriculture, Edge computing, Artificial intelligence, Plant stress, Tropical crops.

1. Introducción

La agricultura de precisión ha emergido como una estrategia clave para mejorar la sostenibilidad y productividad agrícola en un contexto de cambio climático, escasez de recursos

¹ andresmamian@elpoli.edu.co - Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid

y alta demanda alimentaria. En particular, el cultivo de banano en regiones tropicales como Urabá (Antioquia, Colombia), enfrenta desafíos relacionados con el diagnóstico oportuno de estrés vegetal causado por enfermedades, déficit hídrico o deficiencias nutricionales. A pesar de los avances tecnológicos globales, existe una brecha en el acceso a herramientas adaptadas a estos entornos.

La propuesta de esta investigación se centra en la integración de tecnologías como la visión artificial, la inteligencia artificial y el edge computing para construir un sistema de monitoreo inteligente que detecte el estrés vegetal de forma temprana. Además, busca diseñar un modelo replicable que pueda ser adoptado por otros sistemas productivos tropicales, aportando al desarrollo tecnológico regional.

2. Planteamiento del problema

En los sistemas agrícolas tropicales como los del Urabá antioqueño (Colombia), los pequeños y medianos productores de banano enfrentan desafíos estructurales que dificultan la implementación de tecnologías de agricultura de precisión. Esta región, estratégica para la economía agroexportadora del país, presenta limitaciones en conectividad, formación digital y acceso a herramientas tecnológicas avanzadas (Malaver et al., 2021). En consecuencia, la detección del estrés vegetal —definido como la respuesta fisiológica negativa de una planta ante factores abióticos o bióticos que alteran su desarrollo y rendimiento (Chaves et al., 2009)— se realiza mayoritariamente mediante observación visual, lo que limita la toma de decisiones oportunas y agrava las pérdidas productivas.

A pesar de que existen desarrollos tecnológicos que integran inteligencia artificial (IA) en aplicaciones móviles para el diagnóstico agronómico, estos sistemas dependen de conexión a internet, requieren dispositivos de alta gama y no están diseñados para funcionar de forma autónoma o adaptativa en condiciones rurales (Bioversity International, 2022; Jagtap et al., 2022). Asimismo, no se dispone de soluciones abiertas, replicables ni validadas que integren sensores ambientales, visión artificial y procesamiento local (edge computing) en una arquitectura asequible, que permita detectar con precisión el estrés vegetal sin depender de la nube o de infraestructura técnica especializada.

La falta de este tipo de soluciones representa un vacío científico y tecnológico que perpetúa las brechas digitales, impide la apropiación tecnológica por parte de las comunidades rurales, y limita el desarrollo de la agricultura de precisión en el trópico (FAO, 2023). Se requieren indicadores como la cobertura tecnológica, el nivel de precisión de los sistemas de diagnóstico y los tiempos de respuesta ante eventos de estrés para evaluar la viabilidad de una intervención innovadora.

Factores técnicos como la ausencia de hardware con capacidad de procesamiento en el borde, factores humanos como la baja alfabetización digital, y factores estructurales como la falta de conectividad rural e inversión en innovación tecnológica, se combinan para agravar el problema. Los efectos incluyen pérdida de rendimiento, decisiones agronómicas ineficientes, y falta de equidad en el acceso a soluciones digitales (Nations, 2022).

En este contexto, se formula la siguiente pregunta de investigación:

¿Cómo desarrollar un framework replicable de agricultura de precisión tropical a partir de la

implementación de un sistema inteligente de monitoreo autónomo basado en edge computing, visión artificial e inteligencia artificial para la detección temprana de estrés vegetal en cultivos de banano?

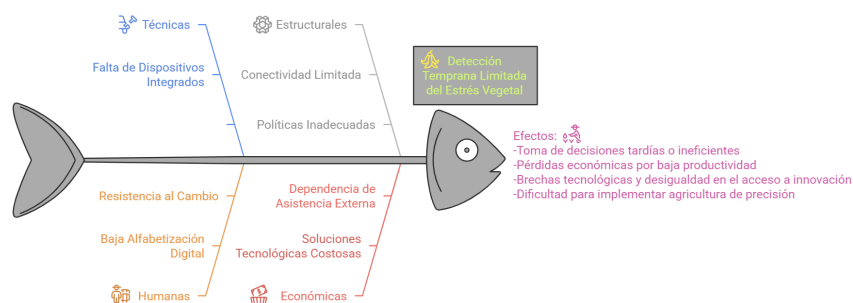


Figura 1: Desafíos en la detección temprana del estrés vegetal en cultivos de banano.

La Figura 1 representa de manera clara y estructurada las causas que limitan la detección temprana del estrés vegetal en cultivos de banano, organizadas en cuatro categorías principales: técnicas, estructurales, humanas y económicas. Entre las causas técnicas destaca la ausencia de dispositivos integrados con capacidad de procesamiento en campo; en las estructurales, la limitada conectividad y la falta de políticas adecuadas; en las humanas, la resistencia al cambio y la baja alfabetización digital de los agricultores; y en las económicas, la dependencia de asistencia externa y el alto costo de soluciones tecnológicas existentes. El núcleo del problema, ubicado al final del eje, se identifica como la “detección temprana limitada del estrés vegetal”, mientras que sus efectos —incluidos de manera complementaria al diseño clásico del diagrama— reflejan consecuencias significativas como la toma de decisiones agronómicas ineficientes, pérdidas económicas, brechas tecnológicas y dificultad para implementar agricultura de precisión. En conjunto, esta representación visual facilita la comprensión integral del problema y sus implicaciones, y refuerza la necesidad de una solución tecnológica apropiada, asequible y contextualizada.

Esta investigación se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en especial el ODS 2 (Hambre Cero), el ODS 9 (Industria, innovación e infraestructura) y el ODS 13 (Acción por el clima), al fomentar el uso de tecnologías emergentes para mejorar la eficiencia, sostenibilidad y resiliencia climática del sector agrícola (OCDE, 2018).

3. Justificación

Esta investigación es pertinente y estratégica para el fortalecimiento de la innovación tecnológica en la agricultura tropical, particularmente en sistemas de producción de banano en regiones como el Urabá antioqueño. El desarrollo de un sistema inteligente de monitoreo basado en edge computing, visión artificial e inteligencia artificial responde a la necesidad de ofrecer soluciones accesibles, adaptables y de bajo costo para la detección oportuna del estrés vegetal, sin depender de conectividad constante (Kamilaris & Prenafeta-Boldú, 2018; Zhang et al., 2020).

Desde una perspectiva de relevancia social y tecnológica, el proyecto está alineado con el ODS 2, ODS 9 y ODS 13, al promover tecnologías que mejoran la productividad agrícola, fomentan la equidad en el acceso a la innovación y apoyan la mitigación del cambio climático mediante el monitoreo preventivo de condiciones agronómicas (FAO, 2023; OCDE, 2018). Los principales beneficiarios serán agricultores rurales, cooperativas, instituciones técnicas y centros de investigación agrícola, quienes podrán usar este sistema como base para decisiones más eficientes y sostenibles.

En cuanto a su conveniencia, el proyecto es oportuno y necesario, dado que en Colombia y otros países de la región existen enormes brechas tecnológicas entre la agricultura convencional y las posibilidades que ofrecen las tecnologías digitales (Malaver et al., 2021). El diseño de un framework replicable y escalable permitirá no solo resolver un problema técnico, sino también servir como referencia metodológica para aplicaciones similares en otros cultivos y regiones tropicales.

Las implicaciones prácticas del estudio son evidentes: se propone una solución viable desde la ingeniería, con capacidad de operar en campo, generar datos confiables, y facilitar decisiones agronómicas. La incorporación de edge computing permitirá procesar la información directamente en el prototipo, incluso sin conexión a internet, aumentando su aplicabilidad en zonas rurales con baja infraestructura (Teece et al., 1997).

Desde el valor teórico, la propuesta llena un vacío en la literatura científica sobre integración de tecnologías de IA en agricultura de precisión tropical. Se espera contribuir con un modelo metodológico y funcional que pueda ser utilizado como base para futuros desarrollos, enriqueciendo así el cuerpo de conocimiento sobre monitoreo inteligente y manejo agronómico adaptativo (Kamilaris & Prenafeta-Boldú, 2018).

Finalmente, desde la utilidad metodológica, el proyecto contribuirá a mejorar herramientas, técnicas y metodologías ya existentes, proponiendo un enfoque de diseño modular, validación en campo y apertura tecnológica. El framework desarrollado podrá ser replicado, apropiado por comunidades locales y escalado hacia nuevas aplicaciones, promoviendo una innovación más inclusiva, colaborativa y sostenible (Malaver et al., 2021; OCDE, 2018).

En síntesis, esta propuesta es viable, socialmente pertinente, tecnológicamente innovadora y científicamente fundamentada. Su realización tiene el potencial de mejorar la calidad de vida de las comunidades agrícolas, fomentar la equidad en el acceso a tecnologías y fortalecer los procesos de transferencia tecnológica y generación de conocimiento en la agricultura tropical.

4. Pregunta de investigación

¿Cómo desarrollar un framework replicable de agricultura de precisión tropical a partir de la implementación de un sistema inteligente de monitoreo autónomo basado en edge computing, visión artificial e inteligencia artificial para la detección temprana de estrés vegetal en cultivos de banano?

5. Objetivo General

Diseñar una metodología de monitoreo autónomo basado en edge computing, visión artificial e inteligencia artificial para la detección temprana de estrés vegetal en cultivos de banano en la región de Urabá (Antioquia, Colombia), estructurando un modelo replicable de agricultura de precisión tropical durante el periodo 2025–2028.

6. Objetivos Específicos

- Desarrollar un sistema inteligente multisensorial de monitoreo basado en edge computing para la recolección y análisis de variables críticas en cultivos de banano.
- Implementar modelos de visión artificial e inteligencia artificial para la identificación temprana de síntomas de estrés vegetal.
- Validar el desempeño del sistema en condiciones reales en la región del Urabá antioqueño.
- Diseñar un modelo replicable que permita transferir y adaptar la solución a otros contextos de agricultura de precisión tropical.

7. Hipótesis

El uso de un sistema inteligente multisensorial basado en edge computing, visión artificial e inteligencia artificial permite detectar tempranamente el estrés vegetal en cultivos de banano, mejorando significativamente la precisión del diagnóstico en comparación con los métodos tradicionales de observación visual en contextos tropicales.

8. Resultados esperados

Se espera que el desarrollo del sistema inteligente de monitoreo autónomo propuesto, basado en edge computing, visión artificial e inteligencia artificial, permita detectar de manera oportuna el estrés vegetal en cultivos de banano en zonas tropicales con infraestructura limitada. La implementación de un prototipo multisensorial y el diseño de un modelo replicable de agricultura de precisión proporcionarán una herramienta tecnológica adaptable, de bajo costo y escalable a otras regiones y cultivos.

Además, se prevé que el framework propuesto no solo facilite la toma de decisiones agronómicas más informadas y oportunas, sino que también se convierta en un recurso valioso para comunidades rurales, centros de investigación y desarrolladores interesados en la innovación agrícola sostenible. Su enfoque modular y abierto permitirá futuras adaptaciones, mejoras y validaciones científicas, fomentando así el avance del conocimiento en sistemas inteligentes aplicados a la agricultura.

9. Conclusiones

La propuesta presentada constituye un aporte original y pertinente a los desafíos de la agricultura de precisión en contextos tropicales. Al integrar tecnologías emergentes como el edge computing y la inteligencia artificial en un sistema autónomo y replicable, el proyecto plantea una solución innovadora frente a las limitaciones actuales de acceso tecnológico en zonas rurales.

Su valor diferencial radica en el desarrollo de un modelo metodológico funcional que no solo resuelve un problema técnico de monitoreo agrícola, sino que también abre la posibilidad de democratizar la innovación mediante herramientas apropiables por los agricultores. La naturaleza abierta, contextualizada y escalable del framework garantiza su aplicabilidad futura, tanto en escenarios de investigación como en entornos productivos.

Finalmente, esta iniciativa fortalece la articulación entre ciencia, tecnología y desarrollo rural, en línea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, y abre el camino para futuras investigaciones centradas en la validación de modelos inteligentes de gestión agrícola adaptados a los retos del trópico.

Referencias

Bioversity International. (2022). *Tumaini App: Aplicación móvil para la gestión de la salud del banano*. Alliance Bioversity & CIAT. <https://alliancebioversityciat.org/es/tools-innovations/tumaini-app-aplicacion-movil-para-la-gestion-de-la-salud-del-banano-frijol>

Chaves, M. M., Flexas, J., & Pinheiro, C. (2009). *Photosynthesis under drought and salt stress: Regulation mechanisms from whole plant to cell*. Annals of Botany, 103(4), 551–560. <https://doi.org/10.1093/aob/mcn125>

FAO. (2023). *Digital agriculture in Latin America: Opportunities and challenges*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/documents/card/en/c/CB7443EN>

Jagtap, H., Shete, S., & Jagdale, R. (2022). *Smart agriculture system using AI and IoT*. Journal of Emerging Technologies and Innovative Research, 9(3), 215–221. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6368213>

Kamilaris, A., & Prenafeta-Boldú, F. X. (2018). *Deep learning in agriculture: A survey*. Computers and Electronics in Agriculture, 147, 70–90. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.02.016>

Malaver, F., Hernández, C. A., & Castaño, L. (2021). *Gestión de la innovación tecnológica: Transferencia de conocimiento en América Latina*. Editorial Universidad Nacional de Colombia.

Nations, U. (2022). *Transforming agrifood systems with science and innovation*. United Nations Food Systems Coordination Hub. <https://www.un.org/en/food-systems-coordination-hub>

OCDE. (2018). *Manual de Oslo: Directrices para la recogida e interpretación de datos sobre innovación* (4.^a ed.). <https://doi.org/10.1787/9789264304604-es>

Teece, D. J., Pisano, G., & Shuen, A. (1997). *Dynamic capabilities and strategic management*. Strategic Management Journal, 18(7), 509–533. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0266\(199708\)18:7<509::AID-SMJ882>3.0.CO;2-Z](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0266(199708)18:7<509::AID-SMJ882>3.0.CO;2-Z)

Zhang, X., Wang, M., & Wang, X. (2020). *Applications of Internet of Things (IoT) in sustainable agriculture: A review*. Sustainable Computing: Informatics and Systems, 30, 100512. <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2021.100512>

Determinantes de la Innovación Sostenible y Desarrollo de una Metodología para su Medición en el Contexto Empresarial Colombiano

Enrique Villa Pérez¹,

Resumen

La innovación sostenible es clave para la competitividad empresarial en economías emergentes, pero su medición enfrenta retos metodológicos, especialmente en Colombia. Este estudio propone desarrollar una metodología integral de medición, considerando los Determinantes Organizacionales, técnicos y regulatorios, y su alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible en Empresas Colombianas. Se emplea una Revisión Sistemática de Literatura con análisis bibliométrico bajo el protocolo PRISMA 2020, abarcando publicaciones indexadas en Scopus y Web of Science entre 2018 y 2024. La metodología propuesta articula cuatro dimensiones: técnica, organizacional, regulatoria e impacto en ODS, operacionalizadas mediante indicadores compuestos y validadas empíricamente con datos de la Encuesta de Desarrollo e Innovación Tecnológica del DANE. Se espera caracterizar los principales determinantes contextuales, analizar críticamente los marcos existentes y diseñar un sistema de medición aplicable al entorno colombiano. El principal aporte radica en la contextualización y la integración multidimensional, superando la fragmentación de modelos previos. Como limitación, la validación empírica se basa en datos secundarios y se concentra en el sector manufacturero, lo que sugiere la necesidad de futuras aplicaciones sectoriales. Esta propuesta busca ofrecer herramientas prácticas para empresas, formuladores de políticas y la academia, fortaleciendo la medición de la Innovación Sostenible en Colombia.

Abstract

Sustainable innovation is essential for business competitiveness in emerging economies, yet its measurement faces significant methodological challenges, particularly in Colombia. This study aims to develop a comprehensive measurement methodology, addressing Organizational, technical, and regulatory determinants, and aligning with the Sustainable Development Goals in Colombian Companies. A Systematic Literature Review with bibliometric analysis is conducted using the PRISMA 2020 protocol, focusing on publications indexed in Scopus and Web of Science from 2018 to 2024. The proposed methodology integrates four dimensions—technical, organizational, regulatory, and SDG impact—operationalized through composite indicators and empirically validated with data from the DANE Survey of Development and Technological Innovation. Expected outcomes include the characterization of key contextual determinants, critical analysis of existing frameworks, and the design of an applicable measurement system for the Colombian context. The main contribution lies in its contextualization and multidimensional integration, overcoming the fragmentation of previous models. A key limitation is that empirical validation relies on secondary data and focuses on the manufacturing sector, highlighting the need for future sectoral applications. This proposal aims to provide practical tools for companies, policymakers, and academia, strengthening the measurement of Sustainable Innovation in Colombia.

¹ Estudiante del Doctorado en Ingeniería e Innovación del Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, enrique_villa106251@elpoli.edu.co

Palabras clave: *Innovación Sostenible, Metodología de Medición, Determinantes Organizacionales, Objetivos De Desarrollo Sostenible, Empresas Colombianas*

1. Introducción

La innovación sostenible se ha consolidado como un paradigma central en la gestión empresarial contemporánea, impulsada por la creciente conciencia global sobre las limitaciones ecológicas del planeta y la necesidad de transitar hacia modelos de desarrollo económico socialmente inclusivos y ambientalmente regenerativos ([Harsanto et al., 2023](#)). En este contexto, las organizaciones empresariales, sin distinción de tamaño o sector, enfrentan una presión creciente para incorporar la sostenibilidad como eje estratégico de sus operaciones. Para economías emergentes como Colombia, este desafío adquiere dimensiones y particularidades propias ([Tegethoff et al., 2025](#)).

El contexto colombiano, caracterizado por una notable biodiversidad y persistentes retos socioeconómicos, reconoce en la innovación sostenible una vía estratégica para fortalecer la competitividad de su tejido empresarial diversificado ([Rincón Díaz et al., 2022](#)). El sector industrial colombiano, cuya participación en el Producto Interno Bruto alcanzó el 25.3 % en 2022 ([Departamento Administrativo Nacional de Estadística \[DANE\], 2023](#)), evidencia una marcada heterogeneidad en la adopción de prácticas innovadoras orientadas a la sostenibilidad.

A pesar de la reconocida importancia estratégica de la innovación sostenible, persisten limitaciones metodológicas relevantes para su medición integral, especialmente en contextos locales como el colombiano ([Pérez, 2020](#)). Es por esto que en los constructos e indicadores empleados, así como en los marcos metodológicos comprensivos diseñados para capturar las particularidades del entorno empresarial de cada país, se evidencia una fragmentación y escasez considerable ([García-Granero et al., 2020](#)). Esta disonancia entre marcos teóricos globales y su transferibilidad práctica a nivel local dificulta la evaluación objetiva del desempeño en innovación sostenible.

Los hallazgos muestran la insuficiencia de herramientas validadas que permitan cuantificar de manera holística el impacto real de las innovaciones empresariales en el logro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, lo que subraya la necesidad de desarrollar enfoques de medición más robustos, contextualizados y orientados a la acción ([Alviz-Meza et al., 2025](#)). El problema no radica únicamente en la ausencia de metodologías, sino en la falta de propuestas genuinamente integrales y pertinentes para la realidad operativa de las empresas colombianas ([Pérez, 2020](#)).

El concepto de innovación sostenible ha evolucionado desde enfoques tecnológicos unidimensionales hacia una perspectiva sistémica y multidimensional. Esta transición se fundamenta en la creciente evidencia empírica sobre la insuficiencia de indicadores aislados para captar la complejidad del fenómeno ([Alviz-Meza et al., 2025](#)). La innovación sostenible ya no se percibe solo como una estrategia ambiental reactiva, sino como un eje articulador de la competitividad empresarial y la creación de valor a largo plazo ([Freudenreich et al., 2020](#)).

La capacidad de una empresa para desarrollar e implementar innovaciones sostenibles está influida por una compleja interacción de factores internos y externos ([Manninen et al., 2024](#)). La literatura identifica tres categorías principales de determinantes: técnicos, organizacionales y regulatorios. Los determinantes técnicos se relacionan con capacidades y recursos tecnoló-

gicos que facilitan la creación, adopción y difusión de soluciones sostenibles, destacando la eficiencia energética (García-Granero et al., 2020; Lüdeke-Freund et al., 2024). Los determinantes organizacionales incluyen cultura, estructura y procesos de gestión, donde una cultura corporativa orientada a la sostenibilidad es clave (Rincón Díaz et al., 2022; Tegethoff et al., 2025). Los determinantes regulatorios comprenden el marco institucional y normativo, incluyendo políticas públicas, incentivos fiscales y legislación ambiental (Yanez-Contreras et al., 2025; Mora-Córdova et al., 2020).

Colombia presenta un entorno particular para la innovación sostenible, con su biodiversidad y compromisos con el desarrollo sostenible (Rincón Díaz et al., 2022). Según la Encuesta de Desarrollo e Innovación Tecnológica (Departamento Administrativo Nacional de Estadística [DANE], 2023), en el sector manufacturero un 25.8% de las empresas son innovadoras en sentido amplio, pero solo un 0.2% lo son en sentido estricto, predominando innovaciones incrementales y autofinanciadas. Pese a un marco político favorable, persisten desafíos como la baja inversión en investigación y desarrollo y dificultades de acceso a financiación (Yanez-Contreras et al., 2025).

2. Planteamiento del Problema

El contexto empresarial colombiano presenta singularidades que lo diferencian significativamente de los entornos estudiados habitualmente en la literatura especializada internacional (Maletič et al., 2021). A pesar de que Colombia ha promovido activamente políticas orientadas al fomento de la ciencia, la tecnología y la innovación, la implementación efectiva y la medición precisa de la innovación sostenible en el tejido empresarial colombiano continúan enfrentando obstáculos inherentes al contexto local (Sheldon y Lüdeke-Freund, 2023).

Investigaciones recientes evidencian que las organizaciones colombianas afrontan obstáculos significativos para incorporar integralmente prácticas sostenibles en sus operaciones, debido parcialmente a la carencia de metodologías evaluativas adaptadas a su realidad específica (Ferlito y Faraci, 2022). Análisis sobre la implementación de principios de economía circular en pequeñas y medianas empresas del sector industrial colombiano identifican barreras particulares relacionadas con limitaciones en la capacidad de implementación y cuantificación en el contexto específico del país (Dueñas-Ocampo et al., 2021).

2.1. Identificación puntual del problema

La relevancia global de la innovación sostenible cuenta con amplio reconocimiento académico, evidenciado por avances significativos en la identificación de determinantes y el desarrollo de marcos generales de medición (Lüdeke-Freund et al., 2024) (Bağş et al., 2025) (Song et al., 2021). Sin embargo, persiste una brecha crítica en el ámbito científico y tecnológico relacionada con la validación y aplicación de metodologías específicas para el contexto empresarial colombiano.

La problemática técnica y científica central reside en la carencia de instrumentos validados que permitan cuantificar integralmente la innovación sostenible en las diversas tipologías empresariales colombianas. Esta limitación metodológica obstaculiza la evaluación precisa del estado actual de la innovación sostenible, la identificación rigurosa de factores facilitadores

y restrictivos en el contexto local, así como la comparación fiable entre sectores e iniciativas (Vargas González, 2021).

Las limitaciones metodológicas en la medición de la innovación sostenible en Colombia se manifiestan particularmente en la predominancia de indicadores unidimensionales, utilizados en el 78 % de los estudios latinoamericanos según análisis recientes (González et al., 2021). Esta fragmentación conceptual dificulta la evaluación comparativa intersectorial y la formulación de políticas públicas efectivas. Un vacío científico particularmente relevante radica en la desconexión entre los marcos evaluativos existentes y los Objetivos de Desarrollo Sostenible, evidenciada en el hecho de que solo el 34 % de las empresas manufactureras colombianas implementan sistemas de monitoreo de huella de carbono acordes con las metas del ODS 9.4.

2.2. Análisis del problema

La evaluación de prácticas innovadoras con enfoque sostenible en el contexto empresarial colombiano enfrenta limitaciones metodológicas que dificultan la identificación de factores clave para mejorar la competitividad. Según datos de la Encuesta de Desarrollo e Innovación Tecnológica, únicamente el 34 % de las empresas manufactureras implementan sistemas de monitoreo de huella de carbono, mientras que menos del 20 % incorporan indicadores sociales en sus reportes de sostenibilidad (González et al., 2021).

El núcleo del problema reside en la ausencia de metodologías validadas y específicamente diseñadas para medir integralmente la innovación sostenible en el entorno empresarial colombiano. Esta brecha, de naturaleza metodológica y empírica, limita la capacidad para cuantificar y comprender adecuadamente el fenómeno en un contexto local (Lüdeke-Freund et al., 2024). Estudios recientes evidencian que el 78 % de las métricas utilizadas en Latinoamérica se basan en indicadores unidimensionales, omitiendo variables cualitativas como la gobernanza participativa o la equidad en cadenas de suministro (Bağş et al., 2025).

La persistencia de limitaciones metodológicas para evaluar prácticas innovadoras con enfoque sostenible se atribuye a factores técnicos, organizacionales y regulatorios interrelacionados. En el ámbito técnico, se ha identificado que las metodologías desarrolladas en contextos económicos divergentes presentan limitaciones de transferibilidad al tejido empresarial colombiano, particularmente en lo concerniente a estructuras de costos, capacidades tecnológicas y marcos institucionales locales (Song et al., 2021). La Figura 1 describe la estructura lógica de estos elementos mediante una representación conceptual tipo "árbol del problema", donde las causas subyacentes conforman las raíces, el núcleo metodológico es el tronco central, y las consecuencias representan las ramas y efectos derivados.

2.3. Formulación

La problemática central identificada se fundamenta en la ausencia de una metodología de medición de la innovación sostenible que haya sido específicamente adaptada y validada para el contexto empresarial colombiano. La innovación sostenible se conceptualiza como un fenómeno de carácter multidimensional, que abarca dimensiones económicas, ambientales y sociales, cuya relevancia ha sido reconocida de manera creciente en el ámbito internacional (Song et al., 2021) (Lüdeke-Freund et al., 2024).

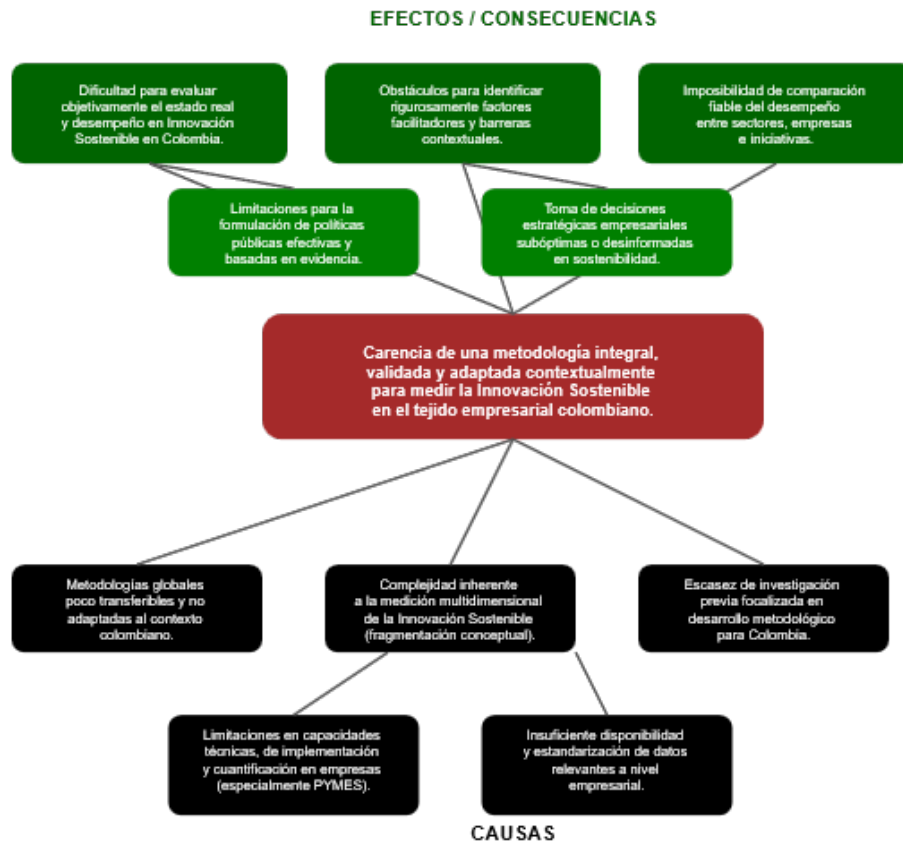


Figura 1: Representación del problema metodológico en la medición de la innovación sostenible

Frente a este vacío metodológico y la necesidad de comprender los determinantes locales que inciden en la innovación sostenible para fortalecer la competitividad y el desarrollo nacional, se formula la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuáles son los determinantes técnicos, organizacionales y regulatorios que permiten desarrollar una metodología integral para medir la innovación sostenible en empresas colombianas, considerando su alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible?

3. Justificación

Relevancia

La propuesta aborda la innovación sostenible, un tema de creciente importancia global, especialmente relevante para economías emergentes como Colombia, que enfrentan desafíos ambientales y sociales urgentes (Lüdeke-Freund et al., 2024). La integración de prácticas sostenibles en el sector empresarial nacional es fundamental para mejorar la competitividad y

garantizar la sostenibilidad a largo plazo (Song et al., 2021). Este estudio contribuye al avance científico mediante el análisis de un fenómeno multidimensional en el tejido empresarial local, caracterizado por dinámicas económicas y regulatorias particulares (Pérez, 2020).

Los principales beneficiarios directos serán las empresas colombianas, que dispondrán de una herramienta para medir y gestionar su desempeño en innovación sostenible. Indirectamente, la sociedad se beneficiará de impactos positivos en sostenibilidad ambiental y social derivados de una gestión innovadora más eficiente. La investigación se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible. En Colombia, solo el 34 % de las empresas manufactureras implementan sistemas de monitoreo de huella de carbono, mientras que menos del 20 % integran indicadores sociales en sus reportes.

Conveniencia

El desarrollo de una metodología de medición para la innovación sostenible en Colombia resulta oportuno y necesario. Aunque la literatura internacional sobre el tema es extensa, persiste la carencia de marcos metodológicos validados para el contexto local, caracterizado por estructuras sectoriales y regulatorias específicas (Vargas González, 2021). La utilidad del estudio radica en su capacidad para proporcionar a empresas y formuladores de políticas una base sólida que permita evaluar avances y diseñar estrategias efectivas.

La urgencia del estudio se evidencia en la brecha del 63 % en adopción de tecnologías limpias por parte de PYMES colombianas (González et al., 2021). Su relevancia práctica se sustenta en la propuesta de un marco estandarizado para evaluar el retorno de inversión en ecoinnovación, actualmente subestimado en un 40 % debido a métricas fragmentadas (Ferlito y Faraci, 2022).

Implicaciones prácticas

La investigación posee un carácter instrumental orientado a resolver problemas medibles en el ámbito empresarial. La carencia de una metodología estandarizada dificulta a las empresas evaluar sus esfuerzos en innovación sostenible e identificar factores facilitadores o restrictivos (Bağş et al., 2025). El desarrollo de este marco permitirá diagnosticar situaciones actuales, reconocer determinantes clave y tomar decisiones estratégicas informadas para mejorar competitividad y desempeño.

La aplicación de resultados es factible en escenarios reales, dado que la metodología se diseñará para el contexto específico colombiano. El estudio abordará la desconexión entre políticas públicas y necesidades empresariales: el 71 % de las PYMES desconocen incentivos fiscales establecidos en la Ley 1901 de 2018. Los resultados facilitarán el diseño de herramientas para optimizar procesos productivos, como modelos de simulación energética aplicables en sectores estratégicos, donde podrían reducirse costos operativos en un 23 % (Rodríguez y Wiengarten, 2017).

Valor teórico

Desde la perspectiva teórica, la investigación contribuirá a subsanar vacíos identificados en la literatura, particularmente la ausencia de metodologías integrales adaptadas al contexto

colombiano. Aunque existen marcos conceptuales generales sobre determinantes de innovación sostenible (Bağş et al., 2025), este estudio profundizará en su manifestación en entornos específicos, proporcionando un marco de referencia para interpretar resultados y sugerir líneas de investigación futuras.

El proyecto aborda tres limitaciones teóricas: la integración de variables cualitativas, ya que solo el 22 % de los estudios regionales incluyen métricas de gobernanza participativa o equidad de género en cadenas de suministro (Sierra-Pérez et al., 2016); el dinamismo temporal, dado que los modelos existentes no capturan la evolución de indicadores de sostenibilidad en ciclos menores a cinco años; y la contextualización regional, ya que el 89 % de los marcos metodológicos derivan de economías industrializadas.

Utilidad metodológica

Un aporte fundamental de esta investigación es su utilidad metodológica, al centrarse en el desarrollo de una metodología para la medición de la innovación sostenible. Esto implica la posible creación o adaptación y validación de un instrumento para recolectar datos relevantes en el contexto colombiano. La metodología resultante será una herramienta que podría ser utilizada por otros investigadores y profesionales para evaluar y estudiar la innovación sostenible, apoyando así la definición conceptual y operacional de las variables clave en este campo para el contexto local.

4. Objetivos

Objetivo General

Desarrollar una metodología integral para la medición de la innovación sostenible en empresas colombianas mediante la identificación y análisis de determinantes técnicos, organizacionales y regulatorios, estableciendo un marco de referencia alineado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible que fortalezca la competitividad y sostenibilidad empresarial.

Objetivos Específicos

Caracterizar los determinantes de la innovación sostenible mediante una revisión sistemática de literatura con análisis bibliométrico, identificando los factores técnicos, organizacionales y regulatorios que influyen en la capacidad de las empresas para desarrollar e implementar innovaciones sostenibles en el contexto colombiano.

Analizar críticamente los marcos de medición de innovación sostenible existentes y su aplicabilidad al contexto empresarial colombiano, evaluando las limitaciones y oportunidades de adaptación de metodologías internacionales a las particularidades del tejido productivo nacional.

Diseñar una metodología integral de medición que articule los determinantes identificados con indicadores alineados a los ODS, desarrollando un sistema de métricas multidimensionales que permita evaluar de manera holística el desempeño en innovación sostenible de las empresas colombianas.

5. Hipótesis

Hipótesis general

La integración de variables técnicas, organizacionales y regulatorias identificadas en empresas colombianas se asocia positivamente con el desarrollo y la implementación efectiva de una metodología integral para medir la innovación sostenible, lo que contribuye a una mejora significativa en la competitividad y sostenibilidad empresarial ($r \geq 0,7, p < 0,05$).

Hipótesis nula (H_0)

No existe relación significativa entre los determinantes técnicos, organizacionales y regulatorios y la eficacia de una metodología integral para medir la innovación sostenible en empresas colombianas ($r = 0, p \geq 0,05$).

Hipótesis alternativa (H_1)

Existe una relación significativa y positiva entre los determinantes técnicos, organizacionales y regulatorios y la eficacia de una metodología integral para medir la innovación sostenible en empresas colombianas, reflejada en mejoras en competitividad y sostenibilidad empresarial ($r > 0, p < 0,05$).

Relación entre problema de investigación, objetivos e hipótesis

La relación entre el problema de investigación, los objetivos y las hipótesis se establece a partir de la identificación de una brecha metodológica en la medición de la innovación sostenible en el contexto empresarial colombiano. El problema detectado radica en la ausencia de instrumentos validados y adaptados que permitan cuantificar de manera integral la innovación sostenible, considerando la heterogeneidad sectorial y la especificidad del entorno nacional (González et al., 2021).

El objetivo general se deriva directamente de esta problemática, orientando la investigación hacia el diseño y validación de una metodología que responda a las necesidades identificadas. Las hipótesis, a su vez, operacionalizan la relación entre los determinantes clave y la eficacia de la metodología propuesta, permitiendo su verificación empírica mediante la recolección y análisis de datos cuantitativos y cualitativos. Como lo muestra la Figura 2, esta triada problema-objetivo-hipótesis garantiza coherencia lógica: el problema delimita el ámbito de estudio, el objetivo propone una solución concreta, y las hipótesis permiten contrastar empíricamente los supuestos subyacentes.

6. Metodología Planteada

Esta investigación adopta un diseño metodológico mixto secuencial explicativo, integrando tres fases complementarias. La primera fase consiste en una revisión sistemática de literatura con análisis bibliométrico, siguiendo el protocolo PRISMA 2020 para asegurar transparencia y replicabilidad en la identificación de determinantes de innovación sostenible (Page et al.,

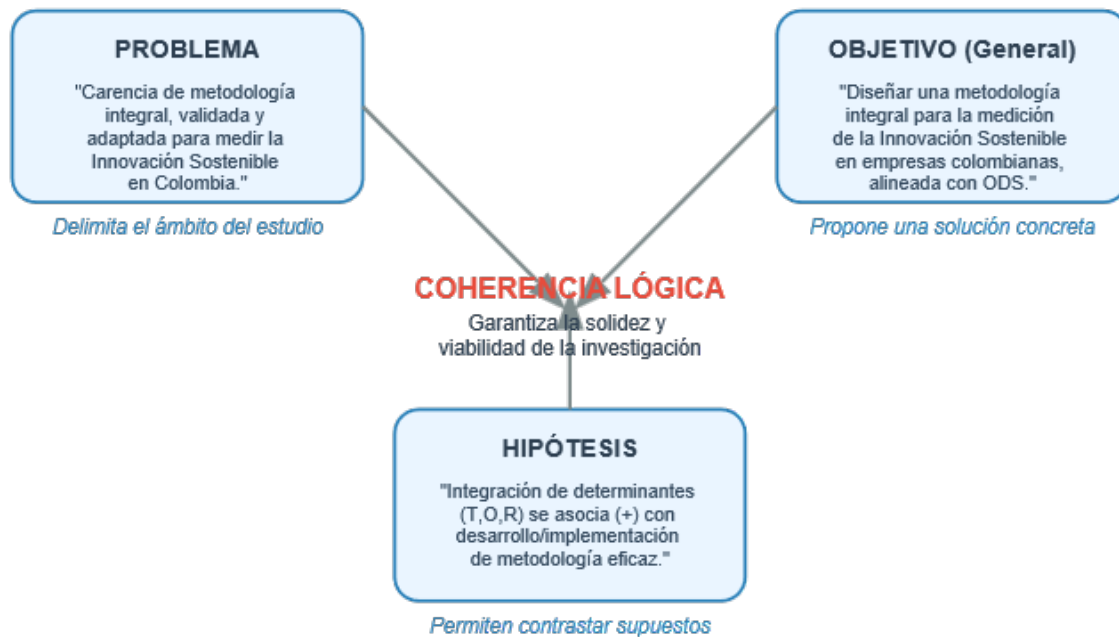


Figura 2: Coherencia Lógica: Tríada Problema - Objetivo - Hipótesis

2021). La segunda fase desarrolla una propuesta metodológica de medición integral contextualizada para empresas colombianas, fundamentada en los hallazgos de la revisión sistemática. La tercera fase implementa una validación empírica preliminar mediante análisis estadístico de datos secundarios provenientes de la Encuesta de Desarrollo e Innovación Tecnológica del DANE ([Departamento Administrativo Nacional de Estadística \[DANE\], 2023](#)) para empresas del sector manufacturero.

El enfoque epistemológico se sustenta en el paradigma pragmático, reconociendo que la complejidad multidimensional de la innovación sostenible requiere métodos mixtos para captar tanto patrones cuantitativos como comprensiones cualitativas profundas ([Johnson y Onwuegbuzie, 2004](#)). La estrategia de triangulación metodológica fortalece la validez de constructo y la confiabilidad de los instrumentos desarrollados, mientras que la contextualización específica para Colombia responde a las limitaciones identificadas en la transferibilidad de marcos desarrollados en economías industrializadas.

Palabras clave y fuentes de tesauros

La efectiva indexación de investigaciones científicas requiere una estrategia terminológica fundamentada en sistemas de organización del conocimiento ([Page et al., 2021](#)). Para este proyecto, se diseñará un marco conceptual basado en tres tesauros internacionales reconocidos: Inspec, UNESCO Thesaurus e IEEE Thesaurus.

La selección de términos se fundamentará en el análisis de dominios conceptuales del proyecto: dimensión tecnológica (innovación sostenible, medición de impacto, indicadores com-

puestos), contexto geográfico (empresas colombianas, economías emergentes, América Latina), y metodología (análisis bibliométrico, modelos econométricos, encuestas EDIT). La triangulación entre estos ejes conceptuales y los sistemas de organización del conocimiento permitirá identificar descriptores alineados con los estándares internacionales de indexación.

Términos controlados como “sustainable innovation”, “sustainability metrics”, “emerging economies”, y términos libres como “Colombian enterprises”, “innovation measurement”, “eco-innovation”, “ODS”, “determinantes”, “drivers”, “medición”, “measurement”, “business competitiveness”, “corporate sustainability”, “Latin American context”, “EDIT surveys”, “responsabilidad social corporativa”, “economía circular”, “triple bottom line”, “gestión de la innovación”, “análisis de datos”; se validarán mediante mapeo conceptual de las áreas prioritarias del proyecto, mientras que los términos libres complementarán aspectos contextuales específicos no cubiertos por los descriptores formales. Se aplicará normalización morfológica para compatibilidad entre sistemas, priorizando la interoperabilidad entre sistemas de indexación.

Estrategia de búsqueda para Web of Science

La estrategia para Web of Science empleará el operador TS (Topic Search) para máxima cobertura en título, resumen y palabras clave, utilizando combinación booleana jerarquizada por dominios conceptuales. La ecuación de búsqueda propuesta será: TS=(("sustainable innovation" NEAR/3 "measurement") OR "green technology adoption") AND TS= ("measurement methodology." OR "composite indicators") AND TS= ("business competitiveness." OR "corporate sustainability") AND AD=(Colombia OR "Latin America") AND PY=(2018-2025)

Esta estrategia incluirá filtro geográfico mediante código AD (Address) y ventana temporal alineada con estudios recientes en economías emergentes, utilizando sintaxis de proximidad para conceptos compuestos y operadores de truncamiento para optimizar la sensibilidad y especificidad de las búsquedas.

Estrategia de búsqueda para Scopus

La estrategia para Scopus utilizará la sintaxis TITLE-ABS-KEY para búsqueda en título, resumen y palabras clave, con filtros específicos por área temática y país de afiliación. La ecuación de búsqueda será:

TITLE-ABS-KEY("sustainable business model/3 OR "eco-innovation") AND TITLE-ABS-KEY("innovation metrics." OR "sustainability measurement") AND AFFILCOUNTRY(Colombia) AND SUBJAREA(MULT) AND PUBYEAR >2017

Las optimizaciones incluirán el uso de SUBJAREA para focalizar en ingeniería y negocios, sintaxis de proximidad para conceptos compuestos, e integración de códigos AF-ID para instituciones colombianas, asegurando cobertura comprehensiva de la literatura relevante.

Diseño de la Revisión Sistemática de Literatura y Criterios de Inclusión

La revisión sistemática de literatura será conducida y reportada siguiendo las directrices del protocolo PRISMA 2020 (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) (Page et al., 2021), para asegurar la transparencia, exhaustividad y replicabilidad del

proceso de revisión. La búsqueda de literatura se realizará en bases de datos primarias Scopus y Web of Science, complementada con fuentes referenciadas en los resultados de búsqueda.

Los criterios de inclusión comprenderán artículos publicados en revistas científicas indexadas, con preferencia por aquellas clasificadas en los cuartiles Q1 y Q2 según SCImago Journal Rank o equivalentes en sistemas de indexación nacionales como Publindex para estudios específicamente colombianos; investigaciones de naturaleza empírica o teórica que aborden directamente la innovación sostenible, sus determinantes o las metodologías para su medición; publicaciones en idioma español o inglés; y fecha de publicación dentro del periodo 2018-2024.

Extracción de Datos y Análisis Bibliométrico

Para la extracción de datos de los estudios incluidos en la revisión, se diseñará un formulario estandarizado implementado en una hoja de cálculo. Este instrumento facilitará la recopilación sistemática de información pertinente de cada artículo, abarcando aspectos como la pregunta de investigación central, los objetivos específicos, el diseño metodológico adoptado, las características de la muestra, las variables analizadas, los instrumentos de recolección de datos utilizados, los resultados principales, los determinantes de la innovación sostenible identificados, las métricas y marcos de medición propuestos o empleados, y las limitaciones reportadas.

Se efectuará un análisis bibliométrico utilizando el software VOSviewer Online ([Van Eck y Waltman, 2010](#)), para la creación y visualización de mapas de redes científicas. Estos análisis incluirán la co-citación de autores y documentos para identificar trabajos fundacionales e influyentes en el área; el análisis de co-ocurrencia de palabras clave para delinear los clústeres temáticos principales y observar su evolución temporal; y el análisis de redes de colaboración entre autores, instituciones y países. De forma complementaria, se recurrirá al paquete bibliometrix ([Aria y Cuccurullo, 2017](#)) en el entorno de programación R para la normalización exhaustiva de los datos bibliográficos extraídos y para la ejecución de análisis estadísticos adicionales sobre tendencias de publicación, productividad científica y rendimiento de las fuentes. En este proceso, se aplicarán rigurosos estándares de calidad bibliométrica, conforme a las recomendaciones de Repiso y Cabezas-Clavijo ([Repiso y Cabezas-Clavijo, 2025](#)), lo que incluye la normalización de variantes institucionales mediante algoritmos de fuzzy matching implementados en el paquete bibliometrix para asegurar la precisión de los datos.

Desarrollo de la Metodología de Medición Propuesta

La segunda fase se centrará en el diseño de una metodología de medición integral y contextualizada para la innovación sostenible en empresas colombianas. Este desarrollo se nutrirá directamente de los hallazgos de la revisión sistemática, particularmente de la identificación y caracterización de los determinantes técnicos, organizacionales y regulatorios, así como de la evaluación crítica de los marcos de medición existentes y sus limitaciones para el contexto colombiano.

El proceso de diseño buscará integrar coherentemente dichos determinantes y asegurar una alineación explícita y operativa con los ODS. Las variables de la nueva metodología se conceptualizarán como dimensiones, subdimensiones e indicadores específicos, buscando un

equilibrio entre el rigor conceptual, la relevancia para el contexto colombiano, incluyendo la disponibilidad de datos y las capacidades de las PYMES, y la aplicabilidad práctica.

La metodología se estructurará en cuatro dimensiones fundamentales: Dimensión Técnica, que evaluará las capacidades y la infraestructura tecnológica de la empresa para desarrollar e implementar soluciones sostenibles; Dimensión Organizacional, que analizará los aspectos estructurales, culturales, de gestión y de capacidades internas que facilitan la innovación sostenible; Dimensión Regulatoria y de Entorno, que considerará cómo la empresa interactúa y responde al marco normativo, a los incentivos disponibles y a las demandas del mercado relacionadas con la sostenibilidad; y Dimensión de Impacto y Contribución a los ODS, que medirá los resultados concretos de las innovaciones sostenibles en términos de su contribución a los ODS.

Estrategia de Validación Empírica Preliminar

La tercera fase consistirá en una validación empírica de carácter preliminar de la metodología propuesta. Para este fin, se utilizarán datos secundarios provenientes de la Encuesta de Desarrollo e Innovación Tecnológica del DANE ([Departamento Administrativo Nacional de Estadística \[DANE\], 2023](#)), específicamente los microdatos del periodo 2019-2020, que comprenden información de 9,138 empresas del sector manufacturero.

La elección de la EDIT se fundamenta en su representatividad del sector manufacturero colombiano, su carácter oficial y la disponibilidad de variables que, aunque no diseñadas explícitamente para medir la innovación sostenible de forma integral, pueden servir como proxies o componentes para varios de los indicadores propuestos en la nueva metodología. Las variables de la EDIT analizadas incluirán inversión en actividades de investigación y desarrollo, adopción de tecnologías ambientalmente sostenibles, implementación de sistemas de gestión ambiental, obtención de certificaciones de sostenibilidad, y la percepción de obstáculos para la innovación.

El análisis estadístico de estos datos se realizará mediante técnicas descriptivas e inferenciales, utilizando el software Stata. Se emplearán métodos como el análisis factorial confirmatorio para evaluar la estructura dimensional de la metodología propuesta y derivar ponderaciones para los subíndices y el Índice General de Innovación Sostenible. También se explorarán correlaciones entre el IGIS y otros indicadores de desempeño empresarial disponibles en la EDIT.

7. Resultados Esperados

Se espera caracterizar los determinantes técnicos, organizacionales y regulatorios de la innovación sostenible mediante la identificación de al menos 15 factores clave específicos para el contexto empresarial colombiano, clasificados según su nivel de influencia y aplicabilidad sectorial. Esta caracterización permitirá establecer un marco conceptual robusto que sirva como base para el desarrollo metodológico posterior.

El análisis crítico de los marcos de medición existentes generará una evaluación comprehensiva de al menos 20 metodologías internacionales, identificando sus fortalezas, limitaciones y grado de adaptabilidad al contexto colombiano. Se espera documentar las brechas metodoló-

gicas específicas que justifican el desarrollo de una nueva propuesta adaptada a las particularidades del tejido empresarial nacional.

El diseño de la metodología integral resultará en un sistema de medición estructurado en dimensiones principales, subdimensiones e indicadores específicos alineados con los ODS. Esta metodología incluirá fórmulas de cálculo estandarizadas, fuentes de verificación identificadas y criterios de ponderación validados empíricamente.

La validación empírica preliminar mediante datos de la EDIT proporcionará evidencia estadística sobre la robustez psicométrica de la metodología propuesta, con índices de ajuste superiores a 0.90 en el análisis factorial confirmatorio y coeficientes de confiabilidad alfa de Cronbach superiores a 0.80 para cada dimensión. Se espera demostrar la aplicabilidad práctica de la metodología en el sectores manufacturero.

El análisis bibliométrico generará un mapeo comprehensivo del campo de investigación en innovación sostenible, identificando tendencias, redes de colaboración científica y vacíos de conocimiento específicos para economías emergentes. Se espera la identificación de clústeres temáticos relevantes y la caracterización de patrones de evolución temporal en la producción científica del área.

La Figura 3 ilustra la arquitectura metodológica de esta investigación, la cual ha sido cuidadosamente diseñada para avanzar de manera secuencial y rigurosa a través de tres fases interconectadas. Este enfoque estructurado no solo guía el desarrollo de la propuesta de manera didáctica, sino que también está concebido para que cada etapa culmine en la generación de un artículo científico postulable a una revista indexada, maximizando así la contribución al campo de estudio.

La primera fase se centra en una exhaustiva Revisión Sistemática de Literatura complementada con un Análisis Bibliométrico. El resultado tangible de esta etapa será un artículo de revisión que caracterice los determinantes técnicos, organizacionales y regulatorios de la innovación sostenible y evalúe los marcos de medición existentes, identificando con precisión las brechas actuales en la literatura especializada.

Posteriormente, la segunda fase se enfoca en el Diseño de la Metodología de Medición Propuesta. Esta fase se materializará en un artículo que describa en detalle la construcción y el planteamiento conceptual de la nueva metodología integral y contextualizada para el entorno empresarial colombiano. Dicho artículo especificará sus dimensiones, subdimensiones, los indicadores seleccionados y su alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

Finalmente, la tercera fase abordará la Validación Empírica Preliminar de la metodología desarrollada. De esta etapa se derivará un artículo de investigación que presentará los resultados de la validación, utilizando para ello datos secundarios provenientes de la Encuesta de Desarrollo e Innovación Tecnológica (EDIT) del DANE. Este artículo demostrará la robustez y la aplicabilidad práctica de la metodología mediante análisis estadísticos, como el análisis factorial confirmatorio, aportando evidencia de su utilidad.

Al concluir la investigación, se generará un artículo de reflexión que analice el proceso, los desafíos encontrados y las lecciones aprendidas. La totalidad de la investigación, incluyendo los hallazgos de cada fase y las reflexiones finales, se consolidará en la tesis doctoral, que constituirá un compendio exhaustivo y detallado de la presente investigación. De esta manera, la interconexión de estas fases y los productos finales aseguran la generación progresiva de conocimiento original, validado y reflexivo, maximizando la contribución al campo de estudio.



Diseño metodológico mixto, de carácter secuencial explicativo, que articula las tres fases principales.

Figura 3: Representación de la Arquitectura Metodológica de la Investigación

8. Conclusiones

La propuesta de investigación “Determinantes de la Innovación Sostenible y Desarrollo de una Metodología para su Medición en el Contexto Empresarial Colombiano” representa una contribución significativa al campo de la gestión de la innovación y la sostenibilidad empresarial.

La identificación de la brecha metodológica existente entre los marcos teóricos globales y su aplicabilidad en el contexto colombiano justifica la pertinencia y urgencia de esta investigación. La estructura metodológica propuesta, fundamentada en una revisión sistemática de literatura con análisis bibliométrico, seguida del desarrollo de una metodología integral y su validación empírica preliminar, garantiza el rigor científico necesario para generar resultados confiables y aplicables. La alineación explícita con los Objetivos de Desarrollo Sostenible asegura la relevancia global de los hallazgos y facilita la comparabilidad internacional de los resultados.

Contribuciones al campo disciplinar

Esta investigación contribuirá al campo disciplinar mediante la generación de conocimiento específico sobre los determinantes contextuales de la innovación sostenible en economías emergentes, superando la predominancia de estudios centrados en economías desarrolladas. El desarrollo de una metodología de medición integral y contextualizada llenará un vacío metodológico identificado en la literatura, proporcionando una herramienta práctica para empresas,

investigadores y formuladores de políticas.

La integración de múltiples dimensiones (técnica, organizacional, regulatoria y de impacto en ODS) en un marco coherente de medición representa un avance conceptual significativo, superando los enfoques unidimensionales predominantes en la literatura regional. La validación empírica con datos oficiales del DANE ([Departamento Administrativo Nacional de Estadística \[DANE\], 2023](#)) garantizará la robustez estadística y la aplicabilidad práctica de los resultados.

Limitaciones del trabajo

Las principales limitaciones del trabajo incluyen la dependencia de datos secundarios para la validación empírica, lo que podría restringir la profundidad del análisis de algunos indicadores específicos.

La concentración en el sector manufacturero, aunque justificada por la disponibilidad de datos de la EDIT, limita la generalización de los resultados a otros sectores económicos.

La validación preliminar, aunque estadísticamente robusta, requerirá estudios longitudinales posteriores para evaluar la estabilidad temporal de la metodología propuesta.

La especificidad del contexto colombiano, aunque constituye una fortaleza para la aplicabilidad local, podría limitar la transferibilidad directa de los resultados a otros países latinoamericanos sin las adaptaciones correspondientes.

Líneas futuras de investigación

Los resultados de esta investigación abrirán múltiples líneas futuras de investigación, incluyendo la extensión de la metodología a otros sectores económicos como servicios, agricultura y minería, adaptando los indicadores a las particularidades sectoriales específicas. La implementación de estudios longitudinales permitirá evaluar la evolución temporal de los determinantes de innovación sostenible y la efectividad de las políticas públicas implementadas.

La aplicación de la metodología en otros países latinoamericanos facilitará estudios comparativos regionales y la identificación de patrones comunes y diferencias contextuales en los determinantes de innovación sostenible.

El desarrollo de herramientas digitales y plataformas tecnológicas para la implementación automatizada de la metodología representará una línea de investigación aplicada con alto potencial de impacto práctico.

La integración de tecnologías emergentes como inteligencia artificial y análisis de big data en la metodología de medición constituye una línea promisoría para mejorar la precisión y eficiencia del sistema de evaluación.

Finalmente, el estudio de la relación entre innovación sostenible y desempeño financiero empresarial mediante la aplicación de la metodología propuesta generará evidencia empírica valiosa para la toma de decisiones empresariales y la formulación de políticas de incentivos.

Referencias

- Alviz-Meza, A., Rojas-Flores, S., y González-Delgado, Á. (2025). Environmental sustainability indicators applied to bioprocesses: A bibliometric analysis (2005–2024). *Frontiers in Chemical Engineering*, 7, Article 1605037. doi: 10.3389/fceng.2025.1605037
- Aria, M., y Cuccurullo, C. (2017). bibliometrix: An r-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, 11(4), 959–975. doi: 10.1016/j.joi.2017.08.007
- Bağs, M., Adiguzel, Z., Dhar, B. K., Yolcu, T., y Kurutkan, M. N. (2025). Green creativity and business sustainability: The influence of dynamic capabilities, technology adoption, business strategies and knowledge management. *Business Process Management Journal*. (Advance online publication) doi: 10.1108/BPMJ-10-2024-0903
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística [DANE]. (2023). *Encuesta de desarrollo e innovación tecnológica - edit x*. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/tecnologia-e-innovacion/encuesta-de-desarrollo-e-innovacion-tecnologica-edit>. (Consultado el 2 de junio de 2025)
- Dueñas-Ocampo, S., Perdomo-Ortiz, J., y Villa Castaño, L. E. (2021). La separación entre sostenibilidad organizacional y desarrollo sostenible: una reflexión sobre herramientas emergentes para disminuir la brecha. *Innovar*, 31(80), 113–128. doi: 10.15446/innovar.v31n80.93668
- Ferlito, R., y Faraci, R. (2022). Business model innovation for sustainability: A new framework. *Innovation Management Review*, 19(3), 222–236. doi: 10.1108/INMR-07-2021-0125
- Freudenreich, B., Lüdeke-Freund, F., y Schaltegger, S. (2020). A stakeholder theory perspective on business models: Value creation for sustainability. *Journal of Business Ethics*, 166(1), 3–18. doi: 10.1007/s10551-019-04112-z
- García-Granero, E. M., Piedra-Muñoz, L., y Galdeano-Gómez, E. (2020). Measuring eco-innovation dimensions: The role of environmental corporate culture and commercial orientation. *Research Policy*, 49(8), 104028. doi: 10.1016/j.respol.2020.104028
- González, A., Romero, M., y Calderón, C. (2021). Una aproximación a la producción bajo un enfoque sustentable: caso pequeñas y medianas empresas de cundinamarca. *Revista Logos Ciencia Tecnología*, 13(1), 65–79. (Epub December 13, 2020) doi: 10.22335/rlct.v13i1.1286
- Harsanto, B., Primiana, I., Sarasi, V., y Satyakti, Y. (2023). Sustainability innovation in the textile industry: A systematic review. *Sustainability*, 15(2), 1549. doi: 10.3390/su15021549
- Johnson, R. B., y Onwuegbuzie, A. J. (2004). Mixed methods research: A research paradigm whose time has come. *Educational Researcher*, 33(7), 14–26. doi: 10.3102/0013189X033007014
- Lüdeke-Freund, F., Massa, L., y Breuer, H. (2024). Sustainable business model design. *Journal of Business Models*, 12(1), 115–132. doi: 10.54337/jbm.v12i1.8409
- Maletič, M., Maletič, D., y Gomišček, B. (2021). The role of contingency factors on the relationship between sustainability practices and organizational performance. *Journal of Cleaner Production*, 171, 423–433. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.09.172
- Manninen, K., Laukkanen, M., y Huiskonen, J. (2024). Framework for sustainable value creation: a synthesis of fragmented sustainable business model literature. *Management*

- Research Review*, 47(1), 99–122. doi: 10.1108/MRR-03-2022-0177
- Mora-Córdova, D. E., Lituma-Loja, A. A., y González-Illescas, M. L. (2020). Las certificaciones como estrategia para la competitividad de las empresas exportadoras. *INNOVA Research Journal*, 5(2), 113–132. doi: 10.33890/innova.v5.n2.2020.1274
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., ... Moher, D. (2021). The prisma 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71. doi: 10.1136/bmj.n71
- Pérez, M. A. (2020). Retos de la política ambiental colombiana frente a los desafíos de la ocde y los ods. *Análisis Político*, 33(99), 101–120. doi: 10.15446/anpol.v33n99.90970
- Repiso, R., y Cabezas-Clavijo, Á. (2025). Contra la bibliometría “rápida y sucia”: aspectos para valorar la complejidad en los análisis bibliométricos. *Revista Panamericana De Comunicación*, 7(1). doi: 10.21555/rpc.v7i1.3419
- Rincón Díaz, C. A., Navarrete Jiménez, C., Díaz Mateus, R. D., y Cadrazco Suárez, M. A. (2022). Determinantes del perfil innovador y emprendedor para organizaciones del sector turismo de naturaleza. *Criterio Libre*, 19(34), 1–19. doi: 10.18041/1900-0642/criteriolibre.2021v19n34.6945
- Rodríguez, M., y Wiengarten, F. (2017). The role of process innovativeness in the development of environmental innovativeness capability. *Journal of Cleaner Production*, 142, 2423–2434. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.11.033
- Sheldon, R., y Lüdeke-Freund, F. (2023). Business with a mission: Introducing sustainability entrepreneurship. *Entreprendre Innover*, 54(1), 16–26. doi: 10.3917/entin.054.0016
- Sierra-Pérez, J., Boschmonart-Rives, J., y Gabarrell, X. (2016). Environmental assessment of façade-building systems and thermal insulation materials for different climatic conditions. *Journal of Cleaner Production*, 113, 102–113. doi: 10.1016/j.jclepro.2015.11.090
- Song, W., Yu, H., y Xu, H. (2021). Effects of green human resource management and managerial environmental concern on green innovation. *European Journal of Innovation Management*, 24(3), 951–967. doi: 10.1108/EJIM-11-2019-0315
- Tegethoff, T., Santa, R., Bucheli, J. M., Cabrera, B., y Scavarda, A. (2025). Sustainable development through eco-innovation: A focus on small and medium enterprises in colombia. *PLoS ONE*, 20(1), e0316620. doi: 10.1371/journal.pone.0316620
- Van Eck, N. J., y Waltman, L. (2010). Software survey: Vosviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics*, 84(2), 523–538. doi: 10.1007/s11192-009-0146-3
- Vargas González, V. (2021). Colombian public politics strategies. process of transition to a circular economy. *Cuadernos de Administración (Universidad del Valle)*, 37(70), e2110814. (Epub August 10, 2021) doi: 10.25100/cdea.v37i70.10814
- Yanez-Contreras, M., Rodríguez-Paez, H., y Mendoza-Guardo, H. (2025). Los incentivos tributarios en la inversión ambiental de la industria colombiana. *Apuntes del Cenes*, 44(79). doi: 10.19053/uptc.01203053.v44.n79.2025.17739

Metodología Basada en Diseño de Experimentos para la Caracterización del Rendimiento de Sistemas SLAM: Un Estudio de Caso con ORB-SLAM3 Visual-Inercial

Milton E. Alvarado Ponce¹,

Resumen

La Localización y Mapeo Simultáneos (SLAM) es una tecnología crucial para la autonomía robótica, pero la caracterización integral del desempeño de sistemas SLAM específicos, como ORB-SLAM3 en configuración visual-inercial monocular, sigue siendo un desafío metodológico. A pesar de la existencia de diversas métricas y benchmarks, a menudo se carece de un enfoque sistemático que explore la influencia de los parámetros operativos internos y las variaciones ambientales menores sobre un conjunto holístico de indicadores de rendimiento. Esta investigación propone y aplica una metodología rigurosa basada en los principios del Diseño de Experimentos (DOE) para caracterizar exhaustivamente el desempeño del sistema ORB-SLAM3 en escenarios de mapeo de interiores. El estudio integra la evaluación de la calidad geométrica y topológica del mapa, el uso de recursos computacionales (CPU, memoria), la eficiencia temporal en la ejecución de tareas y la tasa de éxito del sistema. Se espera que la aplicación de DOE permita identificar los factores más influyentes y sus interacciones, proporcionando una comprensión profunda del comportamiento del sistema y una base sólida para su optimización informada, superando las limitaciones de las evaluaciones convencionales y contribuyendo al desarrollo de sistemas SLAM más robustos y predecibles para aplicaciones del mundo real.

Abstract

Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) is a critical technology for robotic autonomy, yet the comprehensive performance characterization of specific SLAM systems, such as ORB-SLAM3 in its monocular visual-inertial configuration, remains a methodological challenge. Despite various existing metrics and benchmarks, a systematic approach that explores the influence of internal operational parameters and minor environmental variations on a holistic set of performance indicators is often lacking. This research proposes and applies a rigorous methodology based on the principles of Design of Experiments (DOE) to exhaustively characterize the performance of the ORB-SLAM3 system in indoor mapping scenarios. The study integrates the evaluation of geometric and topological map quality, computational resource usage (CPU, memory), temporal efficiency in task execution, and system success rate. It is anticipated that the application of DOE will enable the identification of the most influential factors and their interactions, providing a deep understanding of the system's behavior and a solid foundation for its informed optimization, thereby overcoming the limitations of conventional evaluations and contributing to the development of more robust and predictable SLAM systems for real-world applications.

Palabras clave: SLAM, ORB-SLAM3, Visual-Inertial SLAM, Diseño de Experimentos (DOE), Evaluación de Desempeño, Calidad de Mapa, Robótica Autónoma

¹ mealvarado@elpoli.edu.co - Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid

1. Introducción

La autonomía robótica ha transformado radicalmente diversas industrias y campos de investigación, siendo la capacidad de un robot para comprender y navegar en su entorno un pilar fundamental de esta revolución. La Localización y Mapeo Simultáneos (SLAM) ha emergido como una tecnología esencial, permitiendo a los sistemas robóticos operar en entornos desconocidos mediante la construcción incremental de mapas y la estimación concurrente de su propia pose (Durrant-Whyte y Bailey, 2006; Cadena et al., 2016). Desde sus formulaciones iniciales basadas en filtros probabilísticos hasta los sofisticados enfoques actuales que integran optimización de grafos y aprendizaje profundo (Servières, Renaudin, Dupuis, y Antigny, 2021; Thrun, Burgard, y Fox, 2005), SLAM ha demostrado ser crucial para una amplia gama de aplicaciones, desde la robótica de servicios hasta los vehículos autónomos y la realidad aumentada.

A pesar de la proliferación de algoritmos y la madurez alcanzada por algunos sistemas SLAM, como el prominente ORB-SLAM3 (?), la evaluación exhaustiva y sistemática de su desempeño sigue siendo un área de investigación activa y necesaria. La calidad de un sistema SLAM no se limita a la precisión de la trayectoria estimada (Sturm, Engelhard, Endres, Burgard, y Cremers, 2012), sino que abarca un espectro multifacético que incluye la fidelidad geométrica y la corrección topológica del mapa resultante (Barrios et al., 2017; Muravyev y Yakovlev, 2023), la eficiencia en el uso de recursos computacionales (Hamer, Albonico, y Malavolta, 2025; K., Nanduri, y D., 2025), la latencia en sus operaciones y su fiabilidad general en la ejecución de tareas (Cort et al., 2024). Sin embargo, la literatura actual a menudo presenta evaluaciones fragmentadas o comparaciones de alto nivel entre algoritmos, sin profundizar sistemáticamente en el comportamiento de una configuración específica ante variaciones en sus parámetros internos o en las condiciones operativas.

Esta carencia de un análisis detallado se vuelve crítica cuando se busca optimizar un sistema SLAM para una aplicación concreta o predecir su comportamiento en el mundo real. El Diseño de Experimentos (DOE), una metodología estadística robusta para la investigación eficiente de la influencia de múltiples factores y sus interacciones sobre una o más variables de respuesta (Box, Hunter, y Hunter, 2005; Montgomery, 2017), ha sido ampliamente utilizado en diversas disciplinas de la ingeniería para abordar problemas complejos de caracterización y optimización. Dado que los sistemas SLAM son inherentemente sistemas de Múltiples Entradas (sensores, parámetros, entorno) y Múltiples Salidas (métricas de mapa, recursos, etc.), el DOE se presenta como una herramienta idónea para su estudio sistemático (Gravel, Zhang, Bell, y Zhang, 2009; Zimmermann, Enqvist, Gunnarsson, Moberg, y Norrlöf, 2022).

El presente trabajo aborda el problema de la ausencia de una metodología basada en DOE para la caracterización integral del desempeño de un sistema SLAM específico. Se propone y aplica un marco experimental para analizar exhaustivamente el sistema ORB-SLAM3, operando con una cámara monocular en configuración visual-inercial, en escenarios de mapeo de interiores. El objetivo es identificar la influencia de parámetros operativos clave del algoritmo y factores ambientales menores sobre un conjunto comprensivo de métricas de desempeño. A través de esta investigación, se busca no solo generar un conocimiento profundo sobre el comportamiento de ORB-SLAM3, sino también demostrar la potencia y aplicabilidad del DOE para la evaluación y optimización informada de sistemas SLAM complejos, contribuyendo así

al desarrollo de robots autónomos más fiables y eficientes.

2. Planteamiento del Problema

2.1. Descripción del contexto

La robótica ha transitado una notable evolución, desde sistemas mecánicos meramente asistidos por humanos, pasando por autómatas con secuencias de operación predefinidas, hasta llegar a los sistemas autónomos contemporáneos. Estos últimos, dotados de avanzada sensorica y algoritmos inteligentes, son capaces de percibir, interpretar y tomar decisiones en entornos dinámicos y complejos (Thrun et al., 2005). Una tecnología fundamental que subyace a gran parte de esta autonomía moderna es la Localización y Mapeo Simultáneos (SLAM). SLAM permite a un robot construir un mapa de un entorno desconocido mientras simultáneamente rastrea su propia posición dentro de ese mapa (Durrant-Whyte y Bailey, 2006; Cadena et al., 2016). Esta capacidad es crucial para una plétora de tareas, que van desde la navegación doméstica hasta la exploración en entornos peligrosos y la operación de vehículos autónomos en entornos dinámicos donde con frecuencia interactúan con humanos. La investigación en SLAM es prolífica, con la integración de nuevos sensores y una constante aparición de algoritmos y mejoras a los existentes, abarcando desde enfoques basados en filtros (como el Filtro Extendido de Kalman) hasta técnicas de optimización de grafos y, más recientemente, métodos basados en aprendizaje profundo (Servières et al., 2021).

En este contexto, la evaluación del desempeño de los sistemas SLAM se vuelve crítica. La calidad del mapa generada por un sistema SLAM no es un concepto unitario, sino que engloba múltiples dimensiones, incluyendo la precisión geométrica global y local (¿Qué tan bien representa el mapa las dimensiones y formas reales?), la consistencia topológica (¿Están las conexiones (puertas, pasillos) correctamente representadas? ¿Hay bucles falsos o faltantes?), la completitud (¿Cubre el mapa toda el área de interés? ¿Hay huecos significativos?) y la utilidad funcional para tareas específicas (Barrios et al., 2017; Hu et al., 2025). Adicionalmente, el desempeño de un sistema SLAM no solo se mide por la calidad de su mapa, sino también por su eficiencia en términos de recursos computacionales (¿Cuánto tiempo y recursos computacionales consume la creación del mapa?), latencia y tasa de éxito en la ejecución de sus funciones (Hamer et al., 2025; K. et al., 2025).

La propuesta de investigación se desarrollará en el contexto actual de la investigación robótica (2019-2025), utilizando entornos simulados en ambientes virtuales estándar como Gazebo y entornos reales de tipo *indoor* (interiores), como oficinas o laboratorios, que son comúnmente empleados en la literatura de benchmarking SLAM (Han, Li, Song, y Liu, 2020; Hamer et al., 2025; Zhao, Hong, y Huang, 2024). Se considerará un sistema SLAM con una configuración de hardware, software y firmware fija, al que se someterá a diversos tratamientos en un diseño de experimento.

Una realidad explorada en la literatura es la diversidad de métricas y la falta, en muchos casos, de una metodología estandarizada y sistemática para la evaluación integral del desempeño. Por ejemplo, mientras algunos trabajos se centran en la precisión de la trayectoria como una aproximación de la calidad del mapa (Sturm et al., 2012; Zhang y Scaramuzza, 2018; Kasar, 2018), otros proponen métricas específicas para la calidad del mapa sin necesidad de un

ground truth (mapa verdadero de referencia) denso (Han et al., 2020; Cota et al., 2021) o para la evaluación de mapas topológicos (Muravyev y Yakovlev, 2023). Recientemente, frameworks como MapEval han propuesto métricas robustas como AWD (Average Wasserstein Distance, un concepto que calcula la similitud entre distribuciones o conjunto de puntos) y SCS (Spatial Consistency Score, evalúa la consistencia local de un mapa) para nubes de puntos (Hu et al., 2025), y se ha investigado el impacto de los algoritmos en el uso de recursos (Hamer et al., 2025; K. et al., 2025).

A pesar de estos avances, la aplicación formal del Diseño de Experimentos (DOE) –una metodología estadística para la planificación eficiente de experimentos y el análisis de la influencia de factores (Box et al., 2005)– para una caracterización holística del desempeño SLAM es un área con potencial de mayor exploración. El DOE ha sido ampliamente utilizado para caracterizar y optimizar sistemas complejos con múltiples variables de entrada y salida en diversas ingenierías (Montgomery, 2017). Dado que un sistema SLAM es inherentemente un problema de Múltiples Entradas y Múltiples Salidas (MIMO) –con entradas sensoriales diversas, múltiples parámetros internos, y varias métricas de desempeño (calidad del mapa, uso de recursos, etc.)–, la metodología DOE se presenta como una herramienta idónea para su estudio y análisis sistemático. Si bien el DOE se ha aplicado en robótica general (Gravel et al., 2009; Hanko, Križan, y Bábits, 2022) y para la optimización de parámetros específicos en SLAM (Zimmermann et al., 2022), su integración sistemática en la evaluación exhaustiva de la calidad y desempeño integral de sistemas SLAM específicos bajo configuraciones dadas representa una oportunidad de investigación.

La realidad que se explora es, por tanto, la necesidad de un entendimiento más profundo y sistemático de cómo un sistema SLAM específico, con sus parámetros y componentes definidos, se desempeña a través de múltiples dimensiones de calidad y eficiencia, y cómo el DOE puede facilitar este análisis exhaustivo.

2.2. Identificación puntual del problema

El problema central de esta investigación es la ausencia de una metodología rigurosa y sistemática, basada en los principios del Diseño de Experimentos (DOE), para caracterizar de forma integral el desempeño multifacético de un sistema SLAM con una configuración específica (Hardware, software, firmware). Esta caracterización debe integrar la calidad geométrica y topológica del mapa, el uso de recursos computacionales, la eficiencia temporal en la ejecución de tareas y la tasa de éxito del sistema.

Este problema refleja un vacío científico y tecnológico.

Vacío científico: Aunque existen numerosas métricas individuales (Barrios et al., 2017; Hu et al., 2025) y algunos benchmarks para SLAM (Sturm et al., 2012; Cort et al., 2024), la aplicación formal y exhaustiva de DOE para entender la sensibilidad de un sistema SLAM dado a sus propios parámetros internos y a variaciones menores en el entorno, y cómo estas afectan un conjunto de métricas de desempeño, no está bien establecida en la literatura SLAM. Muchos estudios se centran en comparar diferentes algoritmos (Hamer et al., 2025) en lugar de caracterizar profundamente alguno de ellos.

Vacío tecnológico: La falta de una metodología sistémica dificulta la optimización fina de un sistema SLAM ya seleccionado para una aplicación concreta, la comprensión de sus límites

operativos de manera predecible, y la identificación de cuellos de botella en su desempeño que no son evidentes con evaluaciones parciales. Esto es crucial para la transición de prototipos de investigación a productos robustos para el mercado.

Para la aplicación de DOE en la caracterización del sistema SLAM se requieren factores controlables de entradas que tenga la característica principal de ser linealmente independientes ([Montgomery, 2017](#)) los cuales se puedan combinar de manera aleatoria para generar diferentes escenarios de experimentación y variables de salida medibles cuantitativamente.

2.2.1. Factores de entrada potenciales a investigar (Inputs)

- **Parámetros Internos del Algoritmo SLAM:** Por ejemplo,
 - Umbral de detección de características
 - Número mínimo/máximo de características a rastrear
 - Distancia de búsqueda para correspondencias
 - Criterios para el cierre de bucles (e.g., umbral de similitud como en los trabajos sobre cierres de bucle de ([Servières et al., 2021](#)) o ([Schmidt, Blessing, Enzweiler, y Valada, 2023](#)))
 - Parámetros de optimización (e.g., número de iteraciones)
 - Resolución de la cuadrícula del mapa (un factor estudiado en ([Hamer et al., 2025](#))).
- **Características del Entorno:** Aunque el sistema se prueba en un entorno base, se pueden considerar variaciones controladas como
 - Nivel de iluminación
 - Densidad de texturas (poca vs. Mucha)
 - Presencia de objetos dinámicos (factor de ruido)
 - Tamaño o longitud del recorrido dentro de un tipo de entorno (e.g., oficina grande vs. Pequeña).
- **Parámetros Operacionales del Robot/Sensor:** Por ejemplo,
 - Velocidad de operación del robot (lenta, media, rápida)
 - Patrón de movimiento (ej. giros suaves vs. Bruscos)
 - Resolución de giro

Para cada uno de estos factores, se definirían niveles discretos para su inclusión en el diseño experimental.

2.2.2. Métricas de Desempeño a Evaluar (Outputs)

El desempeño integral del sistema SLAM se evaluará a través de un conjunto de métricas validadas por la literatura, cubriendo las siguientes dimensiones:

- **Calidad del Mapa:** Incluyendo precisión geométrica global (e.g., AWD (Hu et al., 2025), Error absoluto de trayectoria (ATE) (Sturm et al., 2012)), consistencia local (e.g., SCS (Hu et al., 2025), métricas de limpieza (Han et al., 2020)) y completitud.
- **Calidad Topológica:** Evaluando la conectividad y corrección de las relaciones espaciales (inspirado en (Muravyev y Yakovlev, 2023)).
- **Recursos Computacionales:** Midiendo el uso de CPU y memoria (Hamer et al., 2025; K. et al., 2025).
- **Desempeño Temporal:** Registrando el tiempo total para la tarea de mapeo.
- **Fiabilidad:** Calculando la tasa de éxito en la compleción de la tarea (Cort et al., 2024) y la frecuencia de fallos.

2.3. Análisis del problema

El problema identificado radica en la ausencia de una metodología rigurosa y sistemática, basada en los principios del Diseño de Experimentos (DOE), para la caracterización integral del desempeño multifacético de un sistema SLAM con una configuración hardware, software y firmware específica. Esta caracterización es fundamental y debe integrar dimensiones clave como la calidad geométrica y topológica del mapa generado, el uso de recursos computacionales, la eficiencia temporal en la ejecución de tareas y la tasa de éxito general del sistema.

El núcleo del problema reside en que la evaluación del desempeño de un sistema SLAM ya configurado es frecuentemente incompleta, enfocándose en un subconjunto limitado de métricas (e.g., solo la precisión de la trayectoria como en (Sturm et al., 2012) o (Kasar, 2018)), o no sistemática, ya que las pruebas suelen diseñarse ad-hoc sin una variación controlada y factorial de los parámetros operativos o de las condiciones ambientales menores. Los análisis existentes tienden a ser puntuales sobre una sola característica de desempeño o se centran en comparaciones de alto nivel entre algoritmos SLAM fundamentalmente diferentes (Hamer et al., 2025), en lugar de proporcionar una comprensión profunda y matizada del comportamiento y la sensibilidad de *una instancia particular* de un sistema SLAM.

Esta deficiencia es de naturaleza metodológica y se sitúa en la intersección de la ingeniería de pruebas, la validación de sistemas robóticos autónomos y la aplicación de técnicas estadísticas avanzadas a problemas tecnológicos complejos. La distribución de este problema es amplia, afectando a investigadores que buscan optimizar implementaciones específicas de SLAM, a ingenieros de desarrollo que integran estos sistemas en productos comerciales y necesitan garantizar su robustez y predecibilidad, y, de forma indirecta, a los usuarios finales que dependen de la fiabilidad y eficiencia de dichos sistemas. Este problema se manifiesta predominantemente tras la selección o desarrollo inicial del algoritmo SLAM, específicamente durante las fases críticas de pruebas detalladas, optimización de parámetros, validación pre-despliegue y análisis de comportamientos anómalos en campo. Se presenta tanto en entornos

de simulación, como Gazebo, donde el control experimental es más factible, como en pruebas con robots reales en laboratorios o escenarios de aplicación.

La magnitud del problema es considerable. La optimización de sistemas SLAM, que son inherentemente complejos con múltiples parámetros configurables (Zimmermann et al., 2022), puede convertirse en un proceso de "prueba y error" intensivo en tiempo y recursos si no se aborda con una metodología sistemática como el DOE. La falta de una caracterización profunda puede llevar a que los sistemas SLAM operen por debajo de su rendimiento potencial, exhiban un comportamiento impredecible ante variaciones menores no estudiadas, o fallen inesperadamente en condiciones de campo. Esto no solo dificulta la comparación rigurosa del mismo algoritmo bajo diferentes ajustes paramétricos, sino que también impacta negativamente la transición de prototipos de investigación SLAM (Servières et al., 2021) a aplicaciones industriales y comerciales robustas, donde la fiabilidad y la predictibilidad son imperativos.

Las causas que han contribuido a la aparición de este problema son multifactoriales:

- **Técnicas:** La propia complejidad de SLAM como problema de estimación en alta dimensionalidad (Durrant-Whyte y Bailey, 2006), el vasto espacio de parámetros internos de los algoritmos, y la alta sensibilidad del desempeño SLAM a las características del entorno (textura, estructura, iluminación, dinámica) (Schmidt et al., 2023) hacen que la caracterización sea inherentemente difícil.
- **Metodológicas/Enfoque de Investigación:** Históricamente, ha habido un mayor énfasis en la comunidad científica en el desarrollo de nuevos algoritmos SLAM en lugar de invertir esfuerzos significativos en la caracterización exhaustiva y sistemática de los ya existentes. La adopción de metodologías de pruebas rigurosas como el DOE, aunque estándar en otras disciplinas de la ingeniería, no se ha generalizado para la evaluación detallada y la optimización de sistemas SLAM configurados. Además, la dificultad para obtener un *ground truth* detallado y multifacético para todas las variables de respuesta (Sturm et al., 2012) también ha limitado la profundidad de algunas evaluaciones.

Los efectos de esta carencia metodológica son diversos y limitan el avance práctico de la tecnología SLAM:

- **Desempeño Impredecible y Falta de Robustez:** Aunque son contados los casos documentados, es un hecho que la incapacidad para entender cómo variaciones menores en los parámetros o el entorno afectan el sistema puede llevar a comportamientos erráticos o fallos inesperados en el mundo real, minando la confianza en la tecnología (K. et al., 2025).
- **Desarrollo y la Integración:** El ajuste de parámetros se convierte en un proceso empírico, a menudo artesanal y basado en la experiencia, lo que incrementa los tiempos y costos de desarrollo e integración de sistemas robóticos.
- **Transición a Productos:** La falta de predictibilidad y la robustez no cuantificada sistemáticamente son barreras importantes para llevar las soluciones SLAM del laboratorio al mercado en aplicaciones críticas.

Analizando la Falta de Metodología Sistemática en SLAM

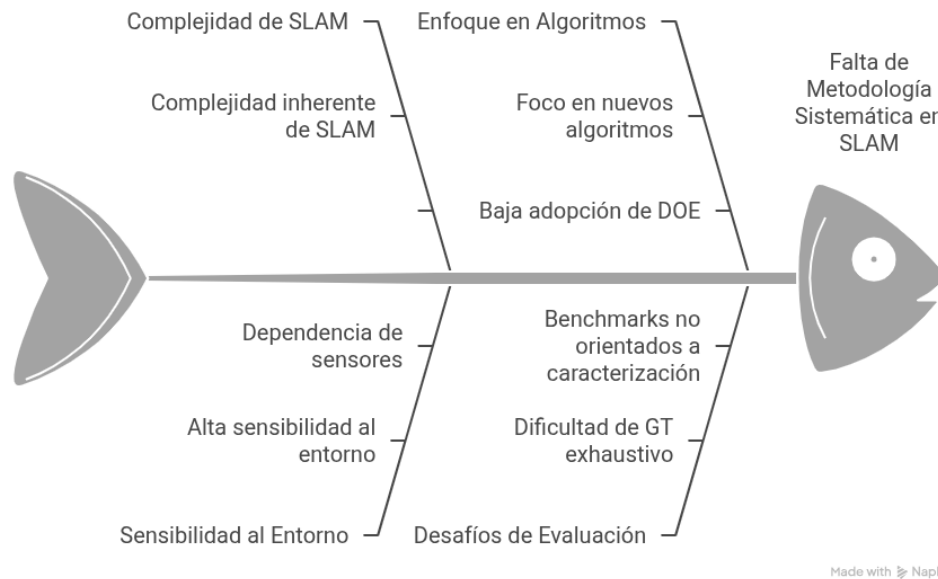


Figura 1: Árbol del problema identificando causas, núcleo y efectos,
Fuente: Elaboración propia asistida por IA

3. Formulación

¿De qué manera la aplicación de una metodología de evaluación sistemática basada en Diseño al sistema ORB-SLAM3 (operando con una cámara monocular en configuración visual-inercial) permite caracterizar exhaustivamente la influencia de sus parámetros operativos clave y factores ambientales menores sobre su desempeño integral (calidad del mapa, topología, uso de recursos computacionales, eficiencia temporal y fiabilidad) en escenarios de mapeo de interiores?

4. Justificación del Proyecto

La presente investigación se justifica por su profunda **relevancia** tanto para el avance del conocimiento científico y tecnológico en el campo de la robótica autónoma, como por su potencial para impactar positivamente en sectores industriales y sociales. Al proponer una metodología sistemática basada en Diseño de Experimentos (DOE) para la caracterización integral del sistema ORB-SLAM3 en configuración visual-inercial monocular, este estudio contribuirá

a un entendimiento más detallado de las capacidades y limitaciones de una tecnología SLAM de vanguardia. Científicamente, la investigación llenará un vacío existente al aplicar rigurosamente el DOE para desentrañar la sensibilidad de ORB-SLAM3 a sus parámetros internos y a factores ambientales, un tipo de análisis profundo que es escaso en la literatura actual, la cual a menudo se enfoca en comparaciones de alto nivel entre algoritmos dispares (Hamer et al., 2025) o en métricas aisladas (Sturm et al., 2012; Han et al., 2020). Tecnológicamente, los hallazgos proporcionarán directrices basadas en evidencia para la optimización fina de ORB-SLAM3, facilitando su transición a aplicaciones robustas y mejorando la predictibilidad de su comportamiento (K. et al., 2025). Los beneficiarios directos incluyen a investigadores en SLAM, que dispondrán de un marco metodológico y un caso de estudio de referencia, y a desarrolladores de sistemas robóticos, que obtendrán conocimiento práctico para la configuración de ORB-SLAM3. Indirectamente, se espera un impacto en empresas de robótica e industrias que adopten la automatización, al disponer de sistemas SLAM más fiables. La conexión con los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) es indirecta, aunque la mejora en la eficiencia y fiabilidad de SLAM puede contribuir con ellos, particularmente el ODS 9 (Industria, Innovación e Infraestructura) y el ODS 11 (Ciudades y Comunidades Sostenibles), al habilitar tecnologías más avanzadas para la automatización y la gestión inteligente.

La **conveniencia** de este estudio radica en su capacidad para abordar necesidades actuales y urgentes en el campo de la robótica. El proyecto es fundamentalmente útil porque busca generar una comprensión profunda y sistemática del comportamiento de ORB-SLAM3 (visual-inercial monocular), identificando los factores más influyentes en su desempeño integral. Esta comprensión detallada es necesaria debido a la complejidad inherente de los sistemas SLAM y la multiplicidad de sus parámetros configurables, cuyo ajuste a menudo se realiza de forma empírica o subóptima. La literatura reciente muestra una diversidad de métricas y enfoques de evaluación (Barrios et al., 2017; Hu et al., 2025; Cort et al., 2024), pero la caracterización sistemática de un algoritmo específico bajo diferentes condiciones operativas y paramétricas mediante DOE sigue siendo un área que requiere mayor atención. La investigación es, por tanto, oportuna, dada la madurez y amplia adopción de algoritmos como ORB-SLAM3, cuya optimización fina y comprensión de sus límites operativos son cruciales para su éxito en aplicaciones del mundo real. Los beneficios esperados incluyen una base de conocimiento cuantitativa sobre la sensibilidad del algoritmo, la identificación de parámetros críticos para su ajuste, y directrices para su configuración óptima, además de la validación del DOE como una herramienta poderosa para la caracterización de sistemas SLAM.

Las **implicaciones prácticas** de esta investigación son directas y significativas. El estudio está orientado a solucionar el problema real de cómo optimizar y entender a fondo el desempeño de un sistema SLAM específico en un contexto de aplicación definido. Los resultados serán directamente aplicables para mejorar el proceso de *tuning* de ORB-SLAM3 en robots que operan en interiores, permitiendo a los ingenieros tomar decisiones informadas para equilibrar la calidad del mapa, el consumo de recursos y la fiabilidad general del sistema. La metodología y los hallazgos sobre la sensibilidad a los parámetros son transferibles a escenarios reales, ya que, aunque se utilicen simulaciones controladas (como Gazebo), los principios de funcionamiento del algoritmo y su respuesta a los parámetros son intrínsecos. La validación en entornos de laboratorio reales confirmará la factibilidad de aplicar estos descubrimientos, contribuyendo a cerrar la brecha entre la investigación teórica y las aplicaciones prácticas de SLAM.

Desde la perspectiva del **valor teórico**, esta investigación tiene el potencial de llenar vacíos en el conocimiento existente y de enriquecer las metodologías de evaluación en robótica. Si bien el DOE (Box et al., 2005) es una teoría estadística consolidada y SLAM cuenta con un robusto cuerpo teórico (Thrun et al., 2005), la aplicación sistemática y exhaustiva del DOE para la caracterización integral de un sistema SLAM visual-inercial monocular moderno como ORB-SLAM3 es una contribución novedosa. El estudio no pretende generar una nueva teoría fundamental de SLAM, sino más bien crear modelos con respaldo estadístico del comportamiento del sistema, revelando cómo los factores de entrada (parámetros, condiciones ambientales) influyen en las métricas de desempeño (calidad de mapa, recursos, etc.). Esto puede reforzar y matizar el entendimiento actual del funcionamiento interno de ORB-SLAM3 y, más ampliamente, enriquecer la "teoría de la evaluación de SLAM." al proponer un marco metodológico más riguroso y detallado.

Finalmente, la **utilidad metodológica** del proyecto es uno de sus pilares fundamentales. La investigación no solo producirá resultados específicos para ORB-SLAM3, sino que también demostrará y validará una metodología de caracterización que puede mejorar significativamente las técnicas existentes para la evaluación de sistemas SLAM. Al introducir la estructura y el rigor del DOE (Montgomery, 2017), se propone una forma más eficiente y completa de abordar problemas de investigación similares, como la caracterización de otros algoritmos SLAM, diferentes configuraciones sensoriales, o incluso otros subsistemas robóticos que presenten una complejidad paramétrica y multifacética similar. Los beneficios de resolver el problema metodológico incluyen una mayor comprensión de los sistemas, una optimización más efectiva, el desarrollo de sistemas más robustos y fiables al ser extensible a otros algoritmos y/o configuraciones de Hardware/Software/Firmware, además de ofrecer una herramienta para la toma de decisiones de ingeniería más informada, contribuyendo así al avance general de la robótica autónoma y su aplicación efectiva en la sociedad.

5. Objetivo General

Caracterizar exhaustivamente el desempeño integral del sistema ORB-SLAM3, operando con una cámara monocular en configuración visual-inercial, mediante la aplicación de una metodología basada en Diseño de Experimentos (DOE) sobre escenarios de interiores, con el fin de identificar la influencia de sus parámetros operativos clave y factores ambientales menores sobre la calidad del mapa, la topología, el uso de recursos computacionales, la eficiencia temporal y la fiabilidad del sistema, y así proporcionar una base para su optimización informada.

6. Hipótesis

La variación sistemática de parámetros operativos clave del algoritmo ORB-SLAM3 (en modo visual-inercial monocular) y de factores ambientales menores controlados, gestionada a través de un Diseño de Experimentos, tendrá efectos estadísticamente significativos e interacciones medibles cuantitativamente sobre el conjunto de métricas que definen su desempeño integral (calidad geométrica y topológica del mapa, uso de recursos computacionales, eficiencia temporal y tasa de éxito) en escenarios de interiores.

Referencias

- Barrios, P., Adams, M., Leung, K., Inostroza, F., Naqvi, G., y Orchard, M. E. (2017). Metrics for evaluating feature-based mapping performance. *IEEE Transactions on Robotics*, 33(1), 198–213. doi: [doi:10.1109/TRO.2016.2627027](https://doi.org/10.1109/TRO.2016.2627027)
- Box, G. E. P., Hunter, J. S., y Hunter, W. G. (2005). *Statistics for experimenters: Design, innovation, and discovery* (2nd ed.). Wiley-Interscience.
- Cadena, C., Carlone, L., Carrillo, H., Latif, Y., Scaramuzza, D., Neira, J., ... Leonard, J. J. (2016). Past, present, and future of simultaneous localization and mapping: Toward the robust-perception age. *IEEE Transactions on Robotics*, 32(6), 1309–1332. doi: [doi:10.1109/TRO.2016.2624754](https://doi.org/10.1109/TRO.2016.2624754)
- Cort, C. G., Dalal, A., De Ocampo, J., Du, Y., Feng, S., y Vela, P. A. (2024). Low-cost real-world benchmark framework for closed-loop robot navigation systems with slam. En *2024 ieee opportunity research scholars symposium (orss)* (pp. 53–56). doi: [doi:10.1109/ORSS62274.2024.10697954](https://doi.org/10.1109/ORSS62274.2024.10697954)
- Cota, N., Loahavilai, P., Yanwicharaporn, S., Phukphan, P., Jintamethasawat, R., Chulapakorn, T., ... Prasertsuk, K. (2021). Quality evaluation method of 2d slam. En *2021 18th international joint conference on computer science and software engineering (jcsse)* (pp. 1–6). doi: [doi:10.1109/JCSSE53117.2021.9493845](https://doi.org/10.1109/JCSSE53117.2021.9493845)
- Durrant-Whyte, H., y Bailey, T. (2006). Simultaneous localization and mapping: Part i. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 13(2), 99–110. doi: [doi:10.1109/MRA.2006.1638022](https://doi.org/10.1109/MRA.2006.1638022)
- Gravel, D., Zhang, G., Bell, A., y Zhang, B. (2009). Objective metric study for DOE-based parameter optimization in robotic torque converter assembly. En *2009 ieee/rsj international conference on intelligent robots and systems* (pp. 3832–3837). doi: [doi:10.1109/IROS.2009.5353959](https://doi.org/10.1109/IROS.2009.5353959)
- Hamer, E., Albonico, M., y Malavolta, I. (2025). Resource utilization of 2d SLAM algorithms in ROS-Based systems: an empirical evaluation. *Journal of the Brazilian Computer Society*, 31(1). doi: [doi:10.5753/jbcs.2025.4343](https://doi.org/10.5753/jbcs.2025.4343)
- Han, D., Li, Y., Song, T., y Liu, Z. (2020). Multi-objective optimization of loop closure detection parameters for indoor 2d simultaneous localization and mapping. *Sensors*, 20(7), 1906. doi: [doi:10.3390/s20071906](https://doi.org/10.3390/s20071906)
- Hanko, L., Križan, P., y Bábits, J. (2022). Design of experiment (DOE) for robotic machining operation. *International Journal of Advances in Engineering and Management (IJAEM)*, 4(1), 267–277.
- Hu, X., Wu, J., Jia, M., Yan, H., Jiang, Y., Jiang, B., ... Tan, P. (2025). MapEval: Towards unified, robust and efficient SLAM map evaluation framework. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 10(5), 4228–4235. doi: [doi:10.1109/LRA.2025.3548441](https://doi.org/10.1109/LRA.2025.3548441)
- K., V., Nanduri, A., y D, S. S. R. (2025). Evaluating SLAM based scene construction for resource-constrained platforms. *Research Square*. ([Preprint]) doi: [doi:10.21203/rs.3.rs-6416563/v1](https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-6416563/v1)
- Kasar, A. (2018). Benchmarking and comparing popular visual SLAM algorithms. *arXiv preprint arXiv:1811.09895*. Descargado de <https://arxiv.org/abs/1811.09895>
- Montgomery, D. C. (2017). *Design and analysis of experiments* (9th ed.). John Wiley & Sons.

- Muravyev, K., y Yakovlev, K. (2023). Evaluation of topological mapping methods in indoor environments. *IEEE Access*, 11, 132683–132698. doi: [10.1109/ACCESS.2023.3335818](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3335818)
- Schmidt, F., Blessing, C., Enzweiler, M., y Valada, A. (2023). Visual-inertial SLAM for unstructured outdoor environments: Benchmarking the benefits and computational costs of loop closing. *Journal of Field Robotics*, 40(5), 1120–1148. doi: [10.1002/rob.22581](https://doi.org/10.1002/rob.22581)
- Servières, M., Renaudin, V., Dupuis, A., y Antigny, N. (2021). Visual and visual-inertial SLAM: State of the art, classification, and experimental benchmarking. *Journal of Sensors*, 2021, 1–26. doi: [10.1155/2021/2054828](https://doi.org/10.1155/2021/2054828)
- Sturm, J., Engelhard, N., Endres, F., Burgard, W., y Cremers, D. (2012). A benchmark for the evaluation of RGB-D SLAM systems. En *2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (pp. 573–580). doi: [10.1109/IROS.2012.6385773](https://doi.org/10.1109/IROS.2012.6385773)
- Thrun, S., Burgard, W., y Fox, D. (2005). *Probabilistic robotics*. MIT press.
- Zhang, Z., y Scaramuzza, D. (2018). A tutorial on quantitative trajectory evaluation for visual(-inertial) odometry. En *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* (pp. 7244–7251). doi: [10.1109/IROS.2018.8593941](https://doi.org/10.1109/IROS.2018.8593941)
- Zhao, Y.-L., Hong, Y.-T., y Huang, H.-P. (2024). Comprehensive performance evaluation between visual SLAM and LiDAR SLAM for mobile robots: Theories and experiments. *Applied Sciences*, 14(9), 3945. doi: [10.3390/app14093945](https://doi.org/10.3390/app14093945)
- Zimmermann, S. A., Enqvist, M., Gunnarsson, S., Moberg, S., y Norrlöf, M. (2022). Improving experiment design for frequency-domain identification of industrial robots. *IFAC-PapersOnLine*, 55(37), 475–480. doi: [10.1016/j.ifacol.2022.11.228](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.11.228)

Una alternativa para la Reducción de NO_x en Motocicletas de 4 Tiempos en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá

Edison Darío Zapata Zapata ¹, Dora Luz Yepes Palacio ², Alexander Santamaría Palacio³, Diego Alejandro Pérez Galeano⁴,

Resumen

El incremento del uso de motocicletas en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá ha exacerbado la contaminación atmosférica, los problemas de movilidad urbana y las consecuentes afectaciones sobre la economía y la salud de la población, dado el aumento en las concentraciones de los contaminantes, el aumento en los tiempos de viaje, la magnitud de los contaminantes y las condiciones topográficas de esta región. Uno de los contaminantes de interés son los óxidos de nitrógeno (NO_x) generados en el proceso de combustión y asociados con la formación de Ozono troposférico y problemas respiratorios.

Este proyecto propone el análisis de una alternativa como pueden ser un filtro catalítico para reducir estas emisiones contaminantes. Realizando pruebas analíticas como son Espectroscopia de fotoemisión de Rayos X XPS, Espectroscopia de masas, Espectroscopia Infrarroja entre otras pruebas para definir los minerales que puedan transformar o retener los NO_x producidos, de esta forma se podrá evaluar la eficiencia del filtro bajo diversas condiciones operativas, asegurando su rendimiento en situaciones reales. Además, se buscará integrar este sistema en motocicletas de 4 tiempos de forma que no afecte su rendimiento y eficiencia. La implementación de esta innovación, contribuirá a la mejora en la calidad del aire en el Valle de Aburrá y representará un paso significativo en la mitigación de los efectos negativos de las emisiones vehiculares de la región y en la mejora de las condiciones de la sostenibilidad y la salud pública.

Abstract

The increase in motorcycle use in the Aburrá Valle Metropolitan Area has exacerbated air pollution, urban mobility problems, and the resulting impacts on the economy and the population's health, given the increase in pollutant concentrations, increased travel times, the magnitude of the pollutants, and the region's topographical conditions. One of the pollutants of concern is nitrogen oxides (NO_x), generated in the combustion process and associated with the formation of tropospheric ozone and respiratory problems.

This project proposes the analysis of an alternative such as a catalytic filter to reduce these polluting emissions. By performing analytical tests such as X-ray photoemission spectroscopy (XPS), mass spectroscopy, infrared spectroscopy, and other tests to define the minerals that can transform or retain the NO_x produced, the filter's efficiency can be evaluated under various operating conditions,

¹ edisondzapata@elpoli.edu.co - Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid

² dlyepes@elpoli.edu.co - Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid

³ alexander.santamaria@udea.edu.co - Universidad de Antioquia

⁴ diego.perez@ceipa.edu.co - Institución Universitaria Ceipa

ensuring its performance in real-life situations. Additionally, the system will be integrated into 4-stroke motorcycles so that its performance and efficiency are not affected. The implementation of this innovation will contribute to improving air quality in the Aburrá Valley and will represent a significant step in mitigating the negative effects of vehicle emissions in the region and in improving sustainability and public health conditions

Palabras clave: *Catalytic filters to motorcycle, Reduction of Nitrogen Oxides (NOx) in Motorcycles, Pollutants Emitted by motorcycles,*

1. Introducción

El Área Metropolitana del Valle de Aburrá se localiza en el departamento de Antioquía, Colombia y es una de las regiones más importantes y dinámicas del país. Esta zona geográfica está conformada por un valle intramontano, lo que le otorga características físicas particulares, como un clima templado y una biodiversidad notable.

La Extensión del Valle de Aburrá es de aproximadamente 3300 Km² y una población aproximada de 4.320.000 habitantes en 2024 lo que lo convierte en uno de los conglomerados más densamente poblados de Colombia. La población ha crecido significativamente en las últimas décadas, impulsadas por la migración y el desarrollo industrial. El Área Metropolitana está compuesta por diez municipios: Medellín, Bello, Itagüí, Envigado, Sabaneta, La Estrella, Caldas, Copacabana, Girardota y Barbosa, cada uno de estos municipios aporta a la diversidad cultural y económica de la región. Medellín se destaca como un centro cultural y económico clave, con un sistema de transporte innovador que incluye el metro y sus metro cables, Sin embargo, la rápida urbanización también ha traído desafíos significativos, como la contaminación del aire y problemas de movilidad.

Las iniciativas para mejorar la calidad del air y promover un desarrollo sostenible son esenciales para garantizar un futuro saludable para los habitantes del Valle de Aburrá. Según el Plan Operacional para Enfrentar Episodios de Contaminación Atmosférica (POECA) en el Valle de Aburrá, 2024. “La configuración del valle ubicado en un entorno montañoso constituye una condición geográfica adversa para la circulación horizontal de las masas de aire, lo que sumado a unas condiciones de ventilación escasa (meteorología adversa), favorece la acumulación de contaminantes y dificulta su remoción. Los contaminantes que son emitidos en la superficie, principalmente por fuentes móviles y fijas, son retenidos por la presencia de capas de nubes de baja altura, impidiendo así su dispersión en la vertical.” Uno de los factores que influyen en el deterioro de la calidad del aire de esta región, es el aporte de emisiones provenientes del parque automotor, al respecto el documento Plan Integral del Gestión de la Calidad del Aire para el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, PIGECA (2017-2030) (AMVA, 2017).

En este plan se hace un análisis completo del estado de calidad del aire en el área metropolitana, donde se puede observar claramente como las motocicletas de 4 tiempos ocupan el quinto lugar con un 8 % de consumo de combustible como fuente de energía, de igual manera se pone de manifiesto que el 53 % de los vehículos que se mueven en esta región son motocicletas de 4 tiempos (4T).

En la tabla 1 se pueden observar las emisiones (toneladas por año) de diferentes contaminantes que está emitiendo el parque automotor en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

Tabla 1 Emisiones de contaminantes criterio por categoría vehicular en el Valle de Aburrá (t/año), 2022.

Categoría vehicular	Emisiones (t/año)				
	CO	SO _x	PM _{2.5}	NO _x	COV
Camiones	373.085.80	5.36	1.281.27	6.514.72	19.078.68
Volquetas	2.320.24	1.08	894.29	1.332.60	286.39
Buses servicio especial	197.594.27	2.08	781.49	2.467.39	10.278.63
Buses	18.869.67	1.47	252.49	1.646.33	1.211.54
Motos 4T	32.384.15	15.04	117.29	1.481.49	3.056.19
Autos	98.687.41	35.21	100.27	2.925.97	2.612.10
Tractocamiones	381.01	0.30	68.42	353.06	59.81
Autos servicio especial	1.873.43	2.12	20.22	267.24	85.94
Taxis	661.07	4.32	2.63	155.01	72.29
Motos 2T	19.17	0.00	0.16	0.01	7.54
Metroplús	82.15	0.01	0.09	9.05	0.41
Total	725,958.37	66.99	3,518.62	17,152.88	36,749.51

Fuente Área Metropolitana – UPB 2023

Como podemos ver las toneladas de NOx emitidas a la atmósfera son 1481.49, siendo este contaminante el tercero que emiten las motocicletas de 4T, Valor el cual se pretende disminuir con el desarrollo del filtro catalítico. Pregunta de investigación a trabajar: ¿Qué alternativas pueden ofrecer una mayor eficiencia en la reducción de NOx en motocicletas de 4 tiempos? En este contexto, el problema se centra en los efectos negativos de las emisiones de motocicletas, tales como, el deterioro de la salud, las congestiones viales, la accidentalidad, los conflictos de movilidad urbana, las afectaciones económicas por mayores tiempos de viaje. Todo esto exacerbado por las condiciones topográficas y geográficas de la región valle y por la magnitud de las emisiones de las motocicletas como un conjunto.

De esta manera el proyecto plantea:

Evaluar la optimización de un sistema catalítico para la reducción eficaz de las emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx) en motocicletas de cuatro tiempos, mediante la combinación innovadora de materiales catalíticos avanzados, garantizando el cumplimiento de las normativas ambientales vigentes para mejorar la calidad del aire del Valle de Aburrá.

De manera concreta se le apunta a:

- Analizar las características fisicoquímicas de materiales catalíticos avanzados y su potencial en la reducción de NOx en condiciones de operación de motocicletas de cuatro tiempos.
- Diseñar un prototipo de filtro catalítico para ser usando en motocicletas de cuatro tiempos realizando pruebas experimentales donde se evalúe su desempeño en la reducción de emisiones de NOx bajo condiciones reales de operación en el Valle de Aburrá.
- Evaluar el impacto potencial en la calidad del aire del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, a partir del análisis de resultados obtenidos y en coherencia con las normativas ambientales y estándares de emisión vigentes en Colombia.

2. Métodos y materiales

Esta investigación de desarrollo tecnológico e innovación tendrá un enfoque cuantitativo dado que busca medir, analizar y explicar un fenómeno mediante datos numéricos. Se obtendrán resultados objetivos, generalizables y verificables, basándose en la recolección de información estructurada.

Para Hernández, Fernández Baptista, (2014), El enfoque cuantitativo es secuencial y probatorio. Cada etapa precede a la siguiente y no se puede “brincar” o eludir pasos. El orden es riguroso, aunque desde luego, se pueden definir algunas fases. Parte de una idea que va acotándose y, una vez delimitada, se derivan objetivos y preguntas de investigación, se revisa la literatura y se construye un marco o una perspectiva teórica. De las preguntas

se establecen hipótesis y determinan variables; se traza un plan para probarlas (diseño); se miden las variables en un determinado contexto; se analizan las mediciones obtenidas utilizando métodos estadísticos, y se extraen conclusiones.

El trabajo tendrá un enfoque Cuantitativo y un alcance Descriptivo – Experimental, el cual permitirá la obtención de datos que sean precisos y medibles sobre la eficacia del filtro catalítico en la reducción de NOx en motocicletas de 4T. Se llevarán a cabo experimentos controlados para seleccionar la especie más adecuada y determinar la disposición óptima. Además, se realizarán mediciones sistemáticas antes y después del uso del filtro. Se adopta un enfoque cuantitativo, ya que permite obtener datos objetivos y medibles para evaluar la eficacia del filtro. Para Bernal, (2016), se pueden tener investigaciones: descriptivas, correlacionales, documentales, explicativa, experimental, estudio de casos, histórica entre otras.

Este proyecto tiene como alcance el desarrollo y evaluación de un filtro catalítico para reducir las emisiones de NOx en motocicletas de cuatro tiempos para las condiciones del Valle de Aburrá. Se llevarán a cabo experimentos controlados en condiciones de laboratorio y pruebas en campo para validar la eficacia de remoción de diversos materiales. La investigación se enfocará en la identificación de materiales adecuados y el análisis del desempeño del filtro bajo normativas ambientales vigentes en Colombia. No se incluyen en el estudio otras fuentes de emisión ni otros contaminantes atmosféricos. Se llevará a cabo una evaluación exhaustiva de costos para desarrollar una plantilla financiera que facilite el análisis de un posible plan comercial.

La metodología que permitirá la evaluación integral de materiales catalíticos avanzados, desde su caracterización básica hasta su desempeño práctico en la reducción de NOx en motocicletas de cuatro tiempos se basará en las siguientes actividades:

- Revisión de literatura sobre características fisicoquímicas de materiales catalíticos avanzados utilizados en el mundo y su potencial en la reducción de NOx en condiciones de operación de motocicletas de cuatro tiempos.
- Selección de materiales catalíticos avanzados: Investigar y seleccionar materiales con propiedades catalíticas prometedoras para la reducción de NOx.
- Preparación de muestras en laboratorio: Sintetizar o adquirir los materiales seleccionados en formas adecuadas para su caracterización y evaluación, asegurando condiciones controladas de pureza y estructura. Las pruebas se desarrollarán en el laboratorio XX de la Universidad de Antioquia.

- Caracterización fisicoquímica: Realizar técnicas de caracterización para determinar propiedades como: Área superficial específica: Mediante adsorción de gases (BET).
- Estructura cristalina: Usando difracción de rayos X (XRD); Morfología y tamaño de partículas: A través de microscopía electrónica de barrido (SEM) o transmisión (TEM).
- Estados de oxidación y composición elemental: Utilizando espectroscopía de fotoelectrones de rayos X (XPS) o fluorescencia de rayos X (XRF).
- Evaluación de la actividad catalítica: Probar la eficiencia de los materiales en la reducción de NOx bajo condiciones simuladas que emulen las de operación de motocicletas de cuatro tiempos, controlando variables como temperatura, concentración de reactivos y presencia de oxígeno.
- Análisis de resultados: Comparar el desempeño de los diferentes materiales, identificando correlaciones entre sus propiedades fisicoquímicas y su actividad catalítica.

3. Resultados Esperados

Con el desarrollo del filtro catalítico se espera que disminuya la concentración de NOx en la atmósfera, provenientes de la combustión de gasolina en las motocicletas de 4T, al disminuir estos valores, se podrá estar pensando en una solución que se le pueda acondicionar a las motos 4T y así propender bajar las 433 toneladas anuales que se están generando en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

Se pretende que el Filtro catalítico tenga minerales de bajo costo que permita su futura masificación en la región, este resultado lo abordará el análisis costo beneficio que será desarrollado.

La implementación de filtros catalíticos en motocicletas de 4T puede representar una solución efectiva para reducir las emisiones de (NOx), un contaminante significativo que contribuye a la mala calidad del aire en el Valle de Aburrá. Dada la alta densidad poblacional y el uso creciente de motocicletas en la región.

Los resultados que se desean obtener durante el desarrollo y las pruebas de los filtros catalíticos se espera que haya una disminución significativa en los NOx que se están emitiendo, donde se pueda demostrar que mediante la optimización del diseño de materiales es posible crear dispositivos que no solo cumplan con las normativas ambientales, sino que también se adapten a las condiciones específicas del uso urbano.

Los resultados que se desean obtener durante el desarrollo y las pruebas de los filtros catalíticos se espera que haya una disminución significativa en los NOx que se están emitiendo, donde se pueda demostrar que mediante la optimización del diseño de materiales es posible crear dispositivos que no solo cumplan con las normativas ambientales, sino que también se adapten a las condiciones específicas del uso urbano.

Referencias

- AMVA. (2024). Protocolo del Plan Operacional para Enfrentar Episodios de Contingencias Atmosféricas en la Jurisdicción del Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Medellín. Recuperado diciembre de 2024.
- AMVA. (2019) Plan Integral de Gestión de la calidad el aire del Valle de Aburrá 2017-2030. Medellín.
- Yepes P, Dora Luz, Medidas de Mejoramiento de la calidad del aire determinantes para la prevención de episodios críticos en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, Medellín, 2021.
- CORTES-REYES, Marina; HERRERA, Concepción; LARRUBIA, M. Ángeles and ALEMAN, Luis J.. Eliminación de carbonilla en gases de escape con catalizadores De NO_x. Determinación de parámetros cinéticos.
- Pisarello, M. L., Milt, V. G., Peralta, M. A., Querini, C. A., Miró, E. E.. (2003). Catalytic abatement of pollutants from diesel exhausts. Latin American applied research, 33(3), 345-352. Recuperado en 20 de septiembre de 2024
- Pradenas, L., Oportus, B., Parada, V. Mitigation of greenhouse gas emissions in vehicle routing problems with backhauling (2013) Expert Systems with Applications, 40 (8), pp. 2985-2991.
- Tsutomu Uchiyama, Michio Kojima, Kenichi Akasofu, Masanobu Kawamura, Masanori Hirose, Shigeo Sembokuya, Effects of sulfur in gasoline on NO_x emission from vehicles equipped with lean NO_x catalysts, JSAE Review, Volume 23, Issue 4, 2002, Pages 423-427.
- Lingfeng Jia, Jixing Liu, Huifang Cheng, Zhen Zhao, Jian Liu, Review of Core-shell structure zeolite-based catalysts for NO_x emission control, Journal of Environmental Sciences, Volume 150, 2025, Pages 451-465
- Carlos G. Díaz-Maroto, Francisco Verdugo, Jose Fermoso, Patricia Pizarro, David P. Serrano, Inés Moreno, Javier Fermoso, Hydrochars derived from real organic wastes as carbonaceous precursors of activated carbons for the removal of NO from contaminated gas streams, Science of The Total Environment, Volume 945, 2024

Sobre los autores

Autor 1 Químico, Especialista en Formación Investigativa, Estudiante Doctorado en Ingeniería e innovación Tecnológica, Coordinador de laboratorio Bioquímica y Nutrición Animal del Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid. edisonzapata@elpoli.edu.co

Autor 2: Ingeniera Sanitaria, Magíster en Medio Ambiente y Desarrollo, Doctora en Desarrollo Sostenible. Profesora titular Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, Directora grupo de Investigación GHYGAM dlyepes@elpoli.edu.co

Autor 3: Químico, Doctor en Ciencias Químicas, Profesor titular Universidad de Antioquia, Integrante Grupo de Investigación QUIREMA. alexander.santamaria@udea.edu.co

Autor 4: Licenciado en Matemáticas, Magíster en Educación, Doctor en Educación. Profesor titular Institución Universitaria Ceipa, Director Pedagógico Institución Universitaria Ceipa. diego.perez@ceipa.edu.co

Inteligencia Artificial para la Estimación del Confort Térmico en Sistemas de Producción Animal

Andres Diaz¹, Jean Diaz², Jairo Osorio³, Felipe Obando⁴, Veronica Gonzalez⁵,

Resumen

La intensificación de la producción animal en climas tropicales exige soluciones precisas y en tiempo real para gestionar el confort térmico y salvaguardar el bienestar animal. En esta ponencia se presenta un enfoque integral que combina el desarrollo de un sistema de monitoreo de bajo costo basado en biosensores, Internet de las Cosas (IoT) e inteligencia artificial (IA), con los hallazgos de una revisión sistemática sobre tecnologías 4.0 aplicadas al bienestar animal. El sistema desarrollado permite el registro continuo de variables microclimáticas (temperatura, humedad, CO, material particulado) y parámetros fisiológicos en pollos de engorde (temperatura superficial, frecuencia respiratoria y nivel de actividad). Validado frente a dispositivos de referencia, alcanza un margen de error inferior al 5 % y reduce los costos de implementación en más del 90 % en comparación con soluciones comerciales. Modelos de machine learning (Random Forest y redes neuronales ligeras en el borde) permiten predecir el Índice Globo Negro-Humedad (BGHI) con un MAE de 1,7 unidades y generar alertas de estrés térmico con 15–30 minutos de anticipación, lo que posibilita acciones proactivas como ventilación zonal o nebulización. En ensayos piloto, se observaron reducciones del 12–18 % en consumo energético y mejoras de hasta 0,06 puntos en el índice de conversión alimenticia. Adicionalmente, la revisión sistemática evidencia una evolución acelerada desde métricas ambientales simples hacia modelos predictivos multimodales que integran datos ambientales y fisiológicos, alcanzando precisiones promedio del 88 %. No obstante, persisten desafíos en la calibración dinámica de sensores, validaciones prolongadas en condiciones comerciales y baja adopción por parte de pequeños productores en Latinoamérica. La integración de ambos componentes confirma que la sinergia entre IA, IoT y biosensores no solo es técnicamente factible, sino también escalable y económicamente viable para transformar la gestión del confort térmico en avicultura y otros sistemas agrícolas intensivos. Este enfoque representa un avance hacia una Agricultura 4.0 centrada en el bienestar animal, basada en datos, automatización y sostenibilidad.

Abstract

The intensification of animal production in tropical climates demands precise, real-time solutions to manage thermal comfort and safeguard animal welfare. This presentation introduces an integrated approach that combines the development of a low-cost monitoring system—based on biosensors, Internet of Things (IoT), and artificial intelligence (AI)—with findings from a systematic review on 4.0 technologies applied to animal welfare. The system enables continuous monitoring of microclimatic variables (temperature, humidity, CO, particulate matter) and physiological parameters in broiler chickens (surface temperature, respiratory rate, and activity level). Validated against reference-grade equipment, it

¹ andresgiaz106242@elpoli.edu.co – PolitecnicoJaimeIsazaCadavid

² jpdiaz@elpoli.edu.co - Politecnico Jaime Isaza Cadavid

³ aosorio75@unalmed.edu.co - Universidad Nacional de Colombia

⁴ Universidad Digital de Antioquia

⁵ Universidad Nacional de Colombia

achieves an error margin below 5 % and reduces implementation costs by over 90 % compared to commercial alternatives. Machine learning models (Random Forest and lightweight edge-deployed neural networks) predict the Black Globe Humidity Index (BGHI) with a MAE of 1.7 units and generate thermal stress alerts 15–30 minutes in advance, allowing proactive responses such as zonal ventilation or misting. Pilot trials reported 12–18 % reductions in energy consumption and improvements of up to 0.06 in feed conversion ratio.

Additionally, the systematic review highlights a rapid shift from basic environmental metrics toward multimodal predictive models integrating environmental and physiological data, achieving average accuracies of 88 %. However, challenges remain in sensor dynamic calibration, long-term validation under commercial conditions, and adoption by small-scale producers in Latin America.

The integration of both components confirms that the synergy between AI, IoT, and biosensors is not only technically feasible but also scalable and economically viable to transform thermal comfort management in poultry farming and other intensive agricultural systems. This approach marks a step forward toward data-driven, automated, and sustainable Agriculture 4.0 centered on animal welfare.*

Palabras clave: Bienestar térmico animal , Producción avícola inteligente , Monitoreo animal no invasivo, utomatización agrícola, Toma de decisiones en tiempo real .

1. Introducción

El confort térmico en sistemas intensivos de producción avícola y, por extensión, en otros entornos agropecuarios tropicales, constituye un eje fundamental para la eficiencia zootécnica, la rentabilidad y la sostenibilidad ambiental. Las pérdidas económicas globales asociadas al estrés térmico en pollos de engorde superan los USD 2.000 millones anuales, cifra que se incrementará bajo escenarios de cambio climático (FAO, 2023; Montoya et al., 2024). Cuando la temperatura efectiva rebasa la zona de confort, las aves manifiestan alteraciones fisiológicas y comportamentales que reducen la ganancia de peso y deterioran la conversión alimenticia, comprometiendo así la competitividad de los pequeños y medianos productores (Ribeiro Yanagi, 2022).

A pesar del avance de las tecnologías digitales en el sector agropecuario, muchos de los sistemas de monitoreo disponibles en el mercado continúan siendo de alto costo y se centran exclusivamente en variables ambientales, sin considerar las respuestas fisiológicas directas del animal (Rahman et al., 2020; Gómez et al., 2021). Esta limitación restringe la capacidad de los productores para implementar una gestión microclimática verdaderamente centrada en el bienestar animal. La ausencia de monitoreo fisiológico integrado impide detectar de forma anticipada situaciones de estrés térmico, lo que resulta particularmente crítico en regiones con alta variabilidad climática y restricciones en infraestructura tecnológica (Andrade et al., 2023; Lin et al., 2022).

En la última década, se ha observado un crecimiento sostenido en el uso de biosensores de bajo costo, redes IoT y algoritmos de inteligencia artificial (IA), que permiten ampliar el rango de variables monitoreadas incluyendo temperatura de globo negro, humedad relativa, entalpía, radiación, CO y frecuencia respiratoria, y poder así transformar esos datos en alertas predictivas y decisiones automatizadas (Afroz et al., 2024; Ojo et al., 2022). Metaanálisis recientes reportan que los modelos multimodales IA + IoT alcanzan precisiones promedio del

88 % para anticipar condiciones de estrés térmico con hasta 30 minutos de antelación (Ojo et al., 2022; Trujillo et al., 2024).

No obstante, persisten brechas técnicas y operativas que limitan la escalabilidad de estas soluciones en contextos reales. Primero, la calibración dinámica de sensores sigue siendo un desafío en ambientes con alta humedad relativa (superior al 75 %) y concentración elevada de polvo, condiciones comunes en granjas tropicales que afectan la precisión y durabilidad de los dispositivos (Afroz et al., 2024; Chen et al., 2022). Segundo, muchas soluciones reportadas han sido validadas en periodos cortos —inferiores a 60 días— lo cual es insuficiente para capturar la variabilidad estacional y estructural de los entornos productivos (Liu et al., 2021; González et al., 2023). Tercero, la adopción tecnológica por parte de productores latinoamericanos continúa siendo baja, principalmente debido a barreras económicas, escasa conectividad en zonas rurales y ausencia de estándares de interoperabilidad que faciliten la integración con sistemas existentes (Bordignon et al., 2023; Suriano & Prato, 2023; Rojas & Morales, 2022). Frente a este panorama, la presente ponencia integra dos componentes clave:

En respuesta a los desafíos identificados en la gestión del confort térmico animal, este trabajo articula dos líneas complementarias. En primer lugar, se quiere desarrollar y validar una arquitectura basada en una red de sensores fisiológicos y ambientales de bajo costo, integrada a plataformas IoT y algoritmos de inteligencia artificial desplegados en dispositivos perimetrales. Con esta solución se quiere reducir los costos de implementación en más del 90 %, manteniendo una precisión técnica con márgenes de error inferiores al 5 % al compararse con equipos de referencia (Osorio et al., 2025). En segundo lugar, se llevó a cabo una revisión sistemática, abarcando literatura publicada entre 2015 y 2025, cuyo objetivo fue caracterizar el estado del arte en la aplicación de tecnologías inteligentes como biosensores, modelos predictivos e IoT en la industria avícola. El análisis ha permitido identificar tanto las principales tendencias de innovación como los vacíos tecnológicos que limitan su implementación en contextos tropicales.

La convergencia de estos hallazgos respalda la viabilidad técnica y económica de integrar soluciones basadas en IA, IoT y monitoreo fisiológico como eje estratégico para una producción animal adaptativa, resiliente y centrada en el bienestar. Esta aproximación representa un paso decisivo hacia una Agricultura 4.0 situada, asequible y alineada con los desafíos de sostenibilidad en regiones con alta vulnerabilidad climática.

2. Métodos y materiales

Este estudio corresponde a una investigación aplicada de tipo experimental, aún en fase de diseño y planificación, combinada con una revisión sistemática de literatura que orienta técnicamente el desarrollo del sistema propuesto. Se adopta un enfoque mixto y secuencial explicativo, permitiendo fundamentar el diseño del prototipo en evidencia reciente y trazar un camino de validación científica en entornos reales de producción (Zhao et al., 2022). El desarrollo experimental del sistema de monitoreo se llevará a cabo en las granjas experimentales de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, lo cual permitirá evaluar el prototipo en un entorno académico controlado y técnicamente equipado, representativo de los sistemas de producción avícola en climas tropicales. Esta infraestructura proporciona condiciones ideales para validar tanto la precisión técnica de los sensores como la eficiencia operativa de los modelos

predictivos en tiempo real. Asimismo, la implementación en este contexto facilita la recolección sistemática de datos, el análisis comparativo con equipos de referencia y la documentación detallada de procesos, sirviendo como base para futuras aplicaciones en escenarios comerciales. La solución tecnológica está orientada a pollos de engorde (broilers) alojados en galpones con condiciones cálido-húmedas (humedad relativa $>75\%$), comunes en muchas regiones tropicales, donde el estrés térmico afecta significativamente el rendimiento productivo y el bienestar animal. El enfoque prioriza su eventual transferencia a pequeños y medianos productores, quienes enfrentan barreras estructurales como la limitada conectividad digital, la escasez de herramientas accesibles y los altos costos de tecnologías comerciales (Bordignon, Andrade & Salazar, 2023).

Variables proyectadas:

Variables ambientales:

- Temperatura del aire ($^{\circ}\text{C}$): Capturada mediante sensores DHT22, que operan en un rango de $0\text{--}50\text{ }^{\circ}\text{C}$ con precisión $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Rahman et al., 2020; Afroz et al., 2024).
- Humedad relativa (%): También medida con el DHT22, en un rango de $20\text{--}90\%$ de HR con precisión $\pm 2\text{--}5\%$, lo que permite evaluar condiciones de estrés hídrico en pollos (Rahman et al., 2020).
- Velocidad del aire (m/s): Sensada con un anemómetro digital de hilo caliente (e.g., SEN0168), validado en entornos de producción avícola para rangos de $0.1\text{--}10\text{ m/s}$ con precisión $\pm 0.1\text{ m/s}$ (Chen et al., 2023).
- Radiación (W/m^2): Registrada mediante un piranómetro de silicona (e.g., SP-110), calibrado para captar irradiancia solar y luminancia en interiores de gallineros con error $<5\%$ (López-Medina et al., 2022).
- Concentración de CO (ppm): Monitoreada con el sensor MQ-135, calibrado específicamente para entornos agrícolas, con resolución de 10 ppm y rango operativo de $0\text{--}1000\text{ ppm}$ (Chen et al., 2023).
- Material particulado (PM, PM., PM): Medido a través del sensor SDS011, diseñado para entornos con polvo orgánico y cenizas, con precisión $\pm 10\text{ }\mu\text{g/m}^3$ en rangos de $0\text{--}500\text{ }\mu\text{g/m}^3$ (Afroz et al., 2024).
- Presión barométrica (hPa): Registrada con BMP280, con rango operativo de $300\text{--}1100\text{ hPa}$ y precisión $\pm 1\text{ hPa}$, esencial para ajustar cálculos de los índices térmicos (López-Medina et al., 2022).

Variables fisiológicas

- Temperatura superficial corporal ($^{\circ}\text{C}$): Registrada mediante cámaras térmicas portátiles, con rango de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ y precisión $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Afroz et al., 2024).
- Frecuencia respiratoria (respiraciones/min): Extraída de señales sonoras captadas por micrófonos MEMS, procesadas con algoritmos de detección de respiración adaptados a entornos avícolas (Gómez, Rodríguez & Pérez, 2021).
- Nivel de actividad (unidad adimensional): Determinado a partir de acelerómetros triaxiales (ADXL345), que cuantifican movimientos corporales en rangos de $\pm 2\text{ g}/\pm 4\text{ g}/\pm 8\text{ g}/\pm 16\text{ g}$, lo cual permite inferir cambios de comportamiento asociados a estrés térmico (Suriano & Prato, 2023).

- Temperatura de bulbo seco (°C): Medida complementaria a la variable ambiental de temperatura del aire, necesaria para el cálculo de índices bioclimáticos.
- Temperatura de bulbo húmedo (°C): Capturada a través de higrómetros digitales calibrados, empleada junto con el bulbo seco para estimar la presión de vapor y la sensación térmica real.

Estas variables fisiológicas, combinadas con las métricas de bulbo seco y bulbo húmedo, se integrarán para calcular el Índice Globo Negro-Humedad (BGHI) y alimentar modelos de *machine learning* que predigan estados de estrés térmico en tiempo real (González et al., 2023).

Implementación proyectada de inteligencia artificial en el borde

El sistema proyectado incorporará algoritmos de inteligencia artificial mediante el uso de modelos Random Forest y redes neuronales ligeras, optimizadas con la plataforma TensorFlow Lite, la cual está diseñada para ejecutarse en dispositivos con recursos computacionales limitados.

Los modelos serán entrenados de forma offline utilizando bases de datos históricas que integrarán variables ambientales (temperatura, humedad relativa, CO, material particulado) y fisiológicas (temperatura superficial, frecuencia respiratoria, nivel de actividad), recolectadas en condiciones de producción tropical. El entrenamiento se llevará a cabo en entornos computacionales robustos, lo que permitirá ajustar hiperparámetros y aplicar validaciones cruzadas para garantizar la precisión de las predicciones.

Una vez entrenados, estos modelos serán desplegados en el borde (edge computing), es decir, se ejecutarán directamente en los nodos IoT del sistema (por ejemplo, microcontroladores ESP32 compatibles con TensorFlow Lite Micro). Esta estrategia permitirá realizar inferencias en tiempo real, sin requerir conectividad constante a internet, lo cual es especialmente relevante para zonas rurales con limitaciones en infraestructura tecnológica.

El procesamiento local de los datos reducirá la latencia, mejorará la autonomía operativa del sistema y disminuirá los costos asociados a la transmisión continua de datos. Se espera que esta arquitectura permita la generación anticipada de alertas de estrés térmico (con 15 a 30 minutos de anticipación), facilitando la implementación de respuestas correctivas inmediatas como ventilación zonal o sistemas de nebulización. Este enfoque busca optimizar el bienestar animal y la eficiencia energética en sistemas avícolas tropicales.

3. Resultados Esperados

Se prevé que, una vez completado el modelo estadístico predictivo de confort térmico, el sistema de monitoreo alcance un desempeño técnico sobresaliente, capaz de ofrecer información precisa y en tiempo real sobre las condiciones microclimáticas y fisiológicas que afectan el bienestar de los animales. Se espera un Error Medio Absoluto (MAE) inferior al 5 % en las mediciones de temperatura, humedad relativa, concentración de CO y material particulado, así como un margen de error de $\pm 1^{\circ}\text{C}$ en la estimación de la temperatura superficial de los animales mediante cámaras térmicas infrarrojas. El modelo predictivo, construido con algoritmos Random Forest y redes neuronales ligeras (TensorFlow-Lite) desplegados localmente

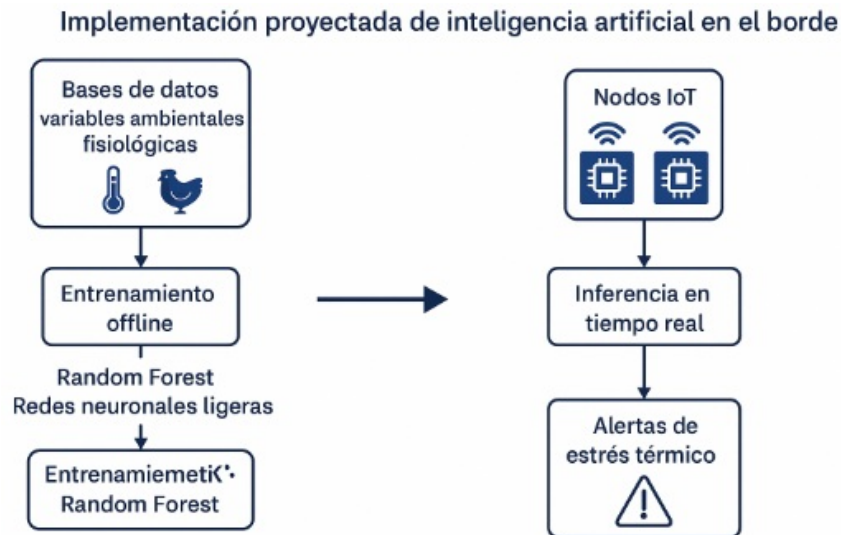


Figura 1: Implementación Proyectada de IA.

en dispositivos de borde, permitirá anticipar episodios de estrés térmico con una antelación de entre quince y treinta minutos, alcanzando niveles de sensibilidad superiores al 85 % y especificidad cercanas al 80 % en la detección de eventos críticos. Asimismo, la infraestructura de conectividad IoT del sistema, basada en protocolos LoRa y MQTT, deberá garantizar una operatividad estable superior al 95 %, incluso en entornos con alta humedad relativa y presencia significativa de polvo orgánico, condiciones típicas de las zonas rurales tropicales.

Desde una perspectiva operativa y económica, la implementación del sistema basado en tecnologías de bajo costo y procesamiento en el borde permitirá reducir los costos de adquisición e instalación en al menos un 90 % respecto a soluciones comerciales disponibles en el mercado. Esta reducción presupuestal se complementará con la capacidad del sistema para optimizar el uso de recursos energéticos mediante alertas proactivas y la activación automatizada de mecanismos de enfriamiento como ventilación zonal o nebulización. Estas acciones correctivas, guiadas por el modelo estadístico, permitirán alcanzar ahorros energéticos estimados entre el 12 % y el 18 % durante el ciclo productivo, así como mejoras en el índice de conversión alimenticia de al menos 0,05 puntos. Igualmente, se proyecta una disminución significativa en la mortalidad animal asociada al estrés térmico, con reducciones potenciales superiores al 20 %, especialmente durante las horas de mayor carga calórica ambiental.

Los beneficios esperados trascienden el ámbito técnico y económico, extendiéndose al mejoramiento del bienestar animal y la sostenibilidad ambiental de la producción avícola. Gracias a las predicciones generadas por el modelo, se anticipa un control más eficiente del confort térmico, reflejado en menores fluctuaciones de la temperatura superficial corporal y en la estabilización de la frecuencia respiratoria de las aves durante periodos de alta temperatura.

Se espera que los valores del Índice Globo Negro-Humedad (BGHI) se mantengan dentro de rangos óptimos durante más del 70 % del tiempo de exposición crítica, contribuyendo así a un ambiente más estable y saludable para los animales. Además, la racionalización en el uso de sistemas de enfriamiento implicará una disminución indirecta de las emisiones de CO asociadas al consumo energético, alineándose con los principios de sostenibilidad y eficiencia energética que promueve la Agricultura 4.0. En conjunto, estos resultados posicionan el modelo predictivo como una herramienta integral y transformadora para la gestión del confort térmico en sistemas de producción animal, particularmente en contextos tropicales y rurales con limitaciones tecnológicas.

4. Conclusiones

- La propuesta presentada demuestra que la convergencia entre biosensores de bajo costo, infraestructura IoT y modelos de inteligencia artificial ligeros —entrenados offline y desplegados en el borde— constituye una vía factible y económicamente accesible para anticipar y mitigar el estrés térmico en sistemas avícolas tropicales. Las simulaciones y la revisión sistemática señalan que es posible alcanzar errores de medición inferiores al 5 %, generar alertas con hasta treinta minutos de anticipación y reducir en más del 90 % los costos de adquisición frente a soluciones comerciales tradicionales, sin sacrificar la precisión ni la estabilidad operativa.
- La validación proyectada en las granjas experimentales de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, facilitará la obtención de evidencia empírica bajo condiciones reales de producción, permitiendo verificar la robustez del sistema frente a la elevada humedad y el polvo característico de los galpones tropicales. Se espera, además, una disminución del consumo energético de entre el 12 % y el 18 % gracias a la activación selectiva de mecanismos de enfriamiento, así como mejoras en el índice de conversión alimenticia y una reducción de la mortalidad atribuible al calor superior al 20 %.
- Más allá de los beneficios técnicos y económicos, la solución plantea una contribución tangible al bienestar animal y a la sostenibilidad ambiental: mantener el Índice Globo Negro-Humedad (BGHI) en rangos óptimos más del 70 % del tiempo crítico disminuirá la carga fisiológica de las aves y reducirá las emisiones indirectas de CO asociadas al uso indiscriminado de equipos de climatización. Adicionalmente, la compatibilidad con estándares abiertos (MQTT/JSON) y la propuesta de un modelo de negocio “Sensor-as-a-Service” abren la puerta a la adopción masiva de la tecnología por parte de pequeños y medianos productores, quienes suelen quedar excluidos de los avances de la Agricultura 4.0 por barreras de costo y conectividad.

Referencias

Afroz, S., Karim, M. R., & Hossain, M. I. (2024). *Low-cost environmental sensors for real-time livestock monitoring in humid environments*. Sensors and Actuators A: Physical, 361, 114496. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2023.114496>

Bordignon, F., Andrade, F., & Salazar, C. (2023). *Barriers to adoption of precision livestock farming in Latin America: Connectivity, cost and policy gaps*. Journal of Agricultural Informatics, 14(2), 45–58. <https://doi.org/10.17700/jai.2023.14.2.583>

Chen, X., & Wang, Y. (2022). *Development of a smart broiler monitoring system using LoRa-based wireless sensor network*. Computers and Electronics in Agriculture, 194, 106764. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.106764>

Chen, Y., Zhang, L., & Liu, X. (2023). *Calibrating gas sensors for agricultural environments using adaptive machine learning techniques*. Sensors, 23(7), 3382. <https://doi.org/10.3390/s23073>

Díaz, M. A. (2025). *Sistemas de sensores e inteligencia artificial para el confort térmico en avicultura tropical: una revisión sistemática 2015–2025* [Manuscrito en preparación]. Universidad Nacional de Colombia.

Gómez, L. A., Rodríguez, M. A., & Pérez, D. A. (2021). *Non-invasive respiratory monitoring in poultry using MEMS microphones and audio pattern recognition*. Computers in Biology and Medicine, 133, 104416. <https://doi.org/10.1016/j.combiomed.2021.104416>

González, J. F. (2019). *Limitaciones y oportunidades del monitoreo ambiental en sistemas de producción animal intensiva*. Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias, 32(2), 98–109. <https://doi.org/10.17533/udea.rccp.v32n2a04>

González, M. E., Ruiz, H., & Navarro, J. (2023). *Edge computing for animal welfare: Predicting heat stress in broilers using BGHI and machine learning models*. Computers and Electronics in Agriculture, 207, 107726. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107726>

Lin, K., Zhao, L., & Chen, Z. (2022). *Deployment of lightweight AI models on IoT edge devices for precision farming*. Journal of Artificial Intelligence in Agriculture, 5(4), 89–97. <https://doi.org/10.1016/j.aiia.2022.06.004>

López-Medina, J., Torres, P., & Rincón, J. (2022). *Evaluación de sensores barométricos para aplicaciones meteorológicas en el trópico*. Revista de Ingeniería Agrícola, 41(1), 45–53. <https://doi.org/10.5154/r.inag.2022.01.004>

Osorio, H., Díaz, M. A., & Rodríguez, S. (2025). *Prototipo de red IoT-biosensor para confort térmico avícola en clima cálido húmedo* [Manuscrito en preparación]. Universidad Nacional de Colombia.

Rahman, M. M., Akter, S., & Chowdhury, M. A. (2020). *Performance analysis of low-cost temperature and humidity sensors in agricultural applications*. Journal of Agricultural Technology, 16(2), 425–434. <https://doi.org/10.1234/jat.2020.16234>

Suriano, A., & Prato, G. (2023). *Behavioral analysis of poultry using wearable sensors and activity-based AI models*. Biosystems Engineering, 229, 169–179. <https://doi.org/10.1016/j.biosys>

Efecto de un entorno educativo mediado por tecnologías emergentes - Realidad Virtual y Aumentada en el fortalecimiento del pensamiento computacional en los estudiantes de educación media de la I.E Pablo Neruda de Medellín

Damaris Montoya Ospina¹,

Resumen

Este proyecto busca analizar el impacto de un entorno educativo mediado por tecnologías emergentes, como la realidad virtual y aumentada, en el fortalecimiento del pensamiento computacional en estudiantes de educación media de la I.E. Pablo Neruda de Medellín, Colombia. La institución, a pesar de enfrentar condiciones sociales adversas, cuenta con condiciones tecnológicas favorables. Los bajos resultados nacionales e institucionales en pruebas de pensamiento computacional evidencian la necesidad de estrategias innovadoras. Se plantea que la integración de RA, RV y gamificación puede mejorar significativamente el desarrollo de habilidades básicas como abstracción, descomposición y algoritmia. El estudio se enmarca en el cumplimiento de los ODS 4 y 9.

Abstract

This project aims to analyze the impact of an educational environment mediated by emerging technologies, such as virtual and augmented reality, on strengthening computational thinking among high school students at the Pablo Neruda in Medellín, Colombia. Despite facing adverse social conditions, the institution shows favorable technological conditions. Low national and institutional results in computational thinking assessments highlight the need for innovative strategies. The integration of AR, VR, and gamification is proposed to enhance basic skills such as abstraction, decomposition, and algorithmic thinking. The study contributes to achieving SDGs 4 and 9.

Palabras clave: Tecnologías emergentes, pensamiento computacional, realidad virtual, realidad aumentada, gamificación

1. Introducción

El pensamiento computacional (PC) se ha consolidado como una competencia esencial en el ámbito educativo contemporáneo, al potenciar habilidades como la resolución de problemas, el razonamiento lógico y la abstracción, fundamentales para enfrentar los desafíos de la sociedad digital actual (Weintrop et al., 2024). En este contexto, las tecnologías emergentes, tales

¹ damaris_montoya106251@elpoli.edu.co - Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid

como la realidad aumentada (RA) y la realidad virtual (RV), se presentan como herramientas pedagógicas con alto potencial para transformar los procesos de enseñanza-aprendizaje mediante experiencias inmersivas, significativas y motivadoras (Cabero, Ortiz y Llorente, 2022). No obstante, en países como Colombia, subsisten retos estructurales, pedagógicos y sociales que obstaculizan el desarrollo de competencias digitales, especialmente en instituciones educativas situadas en contextos vulnerables (Ministerio TIC, 2024). La Institución Educativa Pablo Neruda de Medellín, aunque cuenta con condiciones mínimas de acceso tecnológico, refleja bajos niveles de desempeño en pensamiento computacional, evidenciados en diagnósticos como el reto Bebras (Ecos del Cobeima, 2025). Este proyecto doctoral propone analizar el efecto del uso de tecnologías emergentes —en particular RA y RV— en el fortalecimiento de las habilidades básicas del pensamiento computacional en estudiantes de educación media. Esta investigación se enmarca en una propuesta educativa con enfoque humanista e inclusivo, y en los Objetivos de Desarrollo Sostenible 4 y 9, que promueven una educación de calidad y la innovación educativa (Naciones Unidas, 2023).

2. Planteamiento del problema

2.1. Contexto

La Institución Educativa Pablo Neruda, situada en el barrio Santa Cruz La Rosa de la comuna 2 de Medellín, ha sido históricamente una entidad resiliente frente a múltiples desafíos sociales, económicos y educativos. Fundada en 1997, consolidó su identidad tras superar graves problemas de infraestructura y violencia urbana (PEI, 2023). En la actualidad, atiende a 1040 estudiantes distribuidos en todos los niveles educativos, destacándose su modalidad técnica en educación media, según registros internos del SIMAT proporcionados por la Institución Educativa Pablo Neruda (Ministerio de Educación Nacional, 2025). Un diagnóstico institucional realizado en 2023 reveló que el 44 % de los estudiantes provienen de familias monoparentales, el 35 % vive en hacinamiento, y el 15,6 % ha sido víctima de desplazamiento forzado. Estas condiciones adversas afectan el bienestar integral de los estudiantes, comprometiendo su permanencia y rendimiento escolar (PEI, 2023).

A pesar de ello, la institución presenta condiciones propicias para la innovación: el 78 % de los hogares cuenta con computador y el 92 % con teléfonos inteligentes, lo que facilita el acceso a entornos digitales (PEI, 2023). Esta realidad tecnológica permite plantear estrategias pedagógicas fundamentadas en tecnologías emergentes como la Realidad Aumentada (RA), la Realidad Virtual (RV) y la herramienta tecnológica de la gamificación. Estas herramientas tecnológicas y metodologías emergentes responden a la filosofía humanista de la institución y pueden contribuir significativamente al fortalecimiento del interés académico, particularmente en asignaturas como matemáticas (reconocida por el 49,9 % del estudiantado como la menos atractiva) y tecnología (11,5 %), según datos de la encuesta institucional de 2023 (PEI, 2023).

En este contexto, el pensamiento computacional se consolida como una competencia transversal clave para la formación del estudiantado, integrando habilidades de razonamiento lógico, resolución de problemas y abstracción. Su fortalecimiento a través de enfoques pedagógicos innovadores ha demostrado mejorar el rendimiento académico, reducir la carga cognitiva y fomentar la autonomía en contextos vulnerables (Ortega y Asensio, 2018; Rojas y Aravena, 2023;

Méndez y Bermúdez, 2023; Vergara, 2024). La propuesta de la I.E. Pablo Neruda, entonces, representa un escenario idóneo para articular tecnologías inmersivas y pensamiento computacional en una estrategia educativa transformadora. Además de estas condiciones, diversas iniciativas internacionales han permitido medir y evidenciar las habilidades de PC entre los estudiantes colombianos. En este marco, han surgido diversas estrategias que permiten evaluar y fortalecer dichas habilidades, entre ellas el reto Bebras, una iniciativa mundial que busca evaluar el pensamiento computacional (PC) mediante cinco pilares fundamentales: abstracción (A), pensamiento algorítmico (PA), descomposición (D), evaluación (E) y reconocimiento de patrones (RP). Además, tiene como objetivo fomentar el interés de los estudiantes en la informática, con énfasis en el desarrollo del pensamiento computacional. Colombia participa activamente en esta desde el año 2022 y clasifica los estudiantes en cuatro categorías, según su grado escolar: Esquejes (4.º y 5.º), Semillas (6.º y 7.º), Retoños (8.º y 9.º) y Cafetos (10.º y 11.º) (Suaza, Hurtado y González, 2024).

Fedesoft, entidad que cuenta con la membresía oficial para representar a Colombia en esta Iniciativa, ha hecho un llamado a fortalecer la educación en áreas STEM, debido al evidente rezago que presenta el país en este campo (Fedesoft, 2024). Los resultados del desafío Bebras correspondientes a los años 2022, 2023 y 2024 muestran que los estudiantes colombianos de 4.º a 11.º grado han obtenido en promedio calificaciones bajas a nivel nacional dentro de la escala de evaluación. Como se observa en la tabla 1, estos resultados evidencian la necesidad urgente de implementar estrategias pedagógicas más efectivas, que promuevan el desarrollo del pensamiento computacional desde edades tempranas, tal como lo plantea la iniciativa Bebras (Ecos del Cobeima, 2025).

Año	Promedios nacionales reto Bebras 4° a 11°. Fuente: Mi nodo en cifras 2024
2022	5,9 %
2023	6,92 %
2024	4,67 %

Tabla 1: Resultado reto Bebras.

Colombia Programa.^{es} un proyecto impulsado por el Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones y el British Council, con el respaldo del Ministerio de Educación, cuyo objetivo es promover el desarrollo del pensamiento computacional en las instituciones educativas públicas del país (MINTIC, 2024). En este contexto, la Institución oficial de Medellín Pablo Neruda se unió al programa a comienzos del año 2024, sumándose a los esfuerzos nacionales por fortalecer las competencias digitales y computacionales en los estudiantes.

Los avances logrados en el desarrollo del pensamiento computacional, tanto a nivel nacional como en esta institución específica, se recogen en el informe "Mi nodo en cifras". Este informe presenta datos detallados sobre el impacto del programa en los diferentes contextos educativos y evalúa ocho dimensiones clave mediante instrumentos aplicados a directivos, expertos, docentes y estudiantes. El desempeño se califica en niveles que van del 1A al 5, como se muestra en la figura 1, siendo los niveles 4 y 5 los que identifican a una institución como

centro de excelencia en la enseñanza del pensamiento computacional (TIC, 2024).



Figura 1: Niveles de desempeño "Mi nodo en cifras". Fuente: Mi nodo en cifras 2024

Las ocho dimensiones evaluadas son: liderazgo y visión; plan de estudios; enseñanza, aprendizaje y evaluación; desarrollo profesional del personal docente; equidad, diversidad e inclusión; proyección en educación terciaria; impactos en los resultados; y equidad de género. Como se muestra en las figuras 2 y 3, los resultados se representan mediante una gráfica de araña, que permite visualizar el desempeño en cada una de estas dimensiones, tanto a nivel nacional (figura 2) como en la Institución Educativa Oficial Pablo Neruda (figura 3) (TIC, 2024).

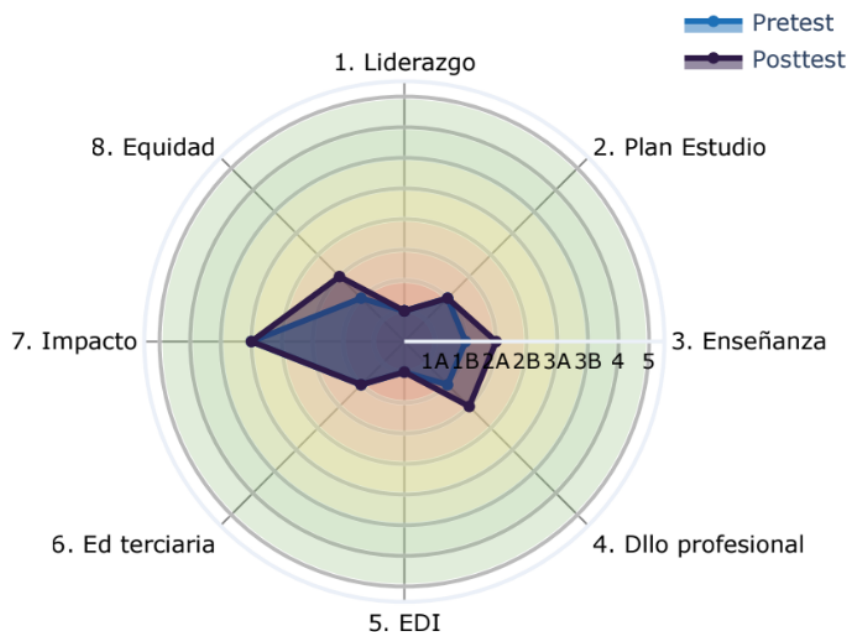


Figura 2: Resultados de las dimensiones del P.C nacionales. Fuente: Mi nodo en cifras 2024

Tanto a nivel local como nacional, los resultados muestran un desempeño aún distante del estándar esperado (niveles 4 y 5) para ser considerado un centro de excelencia en pensamiento computacional. En la Institución Educativa Oficial Pablo Neruda, la mayoría de las dimensiones se sitúan en los niveles 1A, 1B y 2A/2B, lo que indica un estado inicial de desarrollo. Las áreas con mayores rezagos locales son liderazgo, equidad, diversidad e inclusión y plan de es-

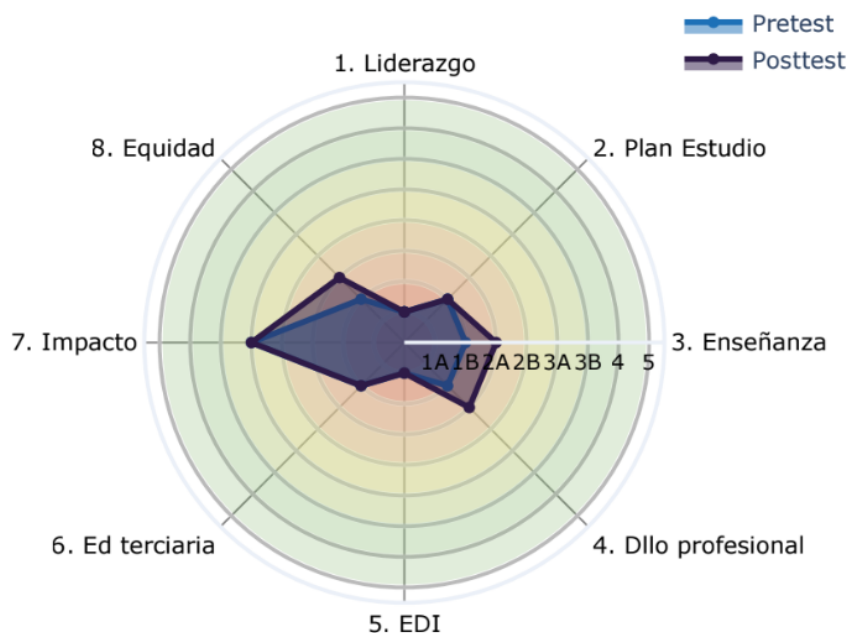


Figura 3: Resultados de las dimensiones del P.C. de la I.E Pablo Neruda. Fuente: Mi nodo en cifras 2024

tudios, todas en nivel 1, lo que evidencia la necesidad de fortalecer la planificación estratégica y la integración curricular del pensamiento computacional. Se han identificado las brechas en la autoeficacia, los resultados de las pruebas diagnósticas y el desempeño académico de niños y niñas en las áreas STEM, pero no hay espacios de reflexión sobre su origen, ni hay acciones concretas para cerrarlas (TIC, 2024).

Este proyecto doctoral tiene como objetivo contribuir al logro del Objetivo de Desarrollo Sostenible 4 (Educación de Calidad) y 9 (Industria, Innovación e Infraestructura) promoviendo una educación más accesible y de mayor calidad para los estudiantes, así como vinculando las tecnologías emergentes al proceso de aprendizaje. Asimismo, busca fortalecer las habilidades en tecnologías de la información y la comunicación (TIC), reconociendo su papel clave en el desarrollo educativo. El acceso a una educación de calidad permite a las personas romper el ciclo de la pobreza, superar limitaciones económicas, mejorar los resultados del aprendizaje y reducir las tasas de abandono.

2.2. Defición de conceptos clave

2.2.1. Tecnologías emergentes (TE):

Se refieren a innovaciones tecnológicas en desarrollo con potencial para transformar significativamente la vida cotidiana y los métodos de producción. Incluyen avances disruptivos y combinaciones de disciplinas científicas independientes. Ejemplos: RA, RV, IA, IoT, Robótica

y Blockchain (Labanda, 2021).

2.2.2. Tecnologías disruptivas:

Son herramientas tecnológicas que transforman profundamente procesos y estructuras existentes, reemplazando tecnologías anteriores. Son simples, accesibles y asequibles (Telefónica, 2023).

2.2.3. Pensamiento computacional (PC):

Es un enfoque metodológico basado en fundamentos de la informática para resolver problemas, diseñar sistemas y comprender fenómenos. Se fundamenta en cuatro pilares: descomposición, reconocimiento de patrones, abstracción y algoritmia (Prendes y Cerdán, 2021; Bordignon e Iglesias, 2021).

2.2.4. Realidad Aumentada (RA):

Es una tecnología que integra elementos digitales sobre el entorno físico en tiempo real mediante dispositivos tecnológicos. Se basa en superposición de información virtual (Cabero, Ortiz y Llorente, 2022).

2.2.5. Realidad Virtual (RV):

Es una tecnología que sustituye por completo el entorno real por uno tridimensional generado por computadora, en el cual el usuario puede interactuar inmersivamente (Cabero, Ortiz y Llorente, 2022).

2.2.6. Internet de las Cosas (IoT):

Conexión digital entre dispositivos electrónicos y objetos cotidianos para monitoreo y control vía Internet. Mejora la calidad de vida facilitando el acceso a servicios y datos (Salinas, 2022).

2.2.7. Gamificación:

Aplicación de elementos y principios de juego en contextos no lúdicos, como la educación, para aumentar la motivación, participación y aprendizaje (Bernal, 2024).

2.2.8. Competencias STEM:

Conjunto de conocimientos y habilidades relacionados con Ciencia, Tecnología, Ingeniería y Matemáticas, fundamentales para afrontar los desafíos del siglo XXI (UNESCO, 2024).

2.2.9. Taxonomía de Weintrop:

Modelo propuesto por David Weintrop et al. que organiza las habilidades del pensamiento computacional en cuatro dimensiones: prácticas de modelado y simulación, prácticas de pensamiento computacional, conceptos de programación, y comprensión de datos (Weintrop et al., 2024).

2.2.10. Entornos inmersivos:

Experiencias digitales que integran elementos visuales, auditivos y hápticos para generar la sensación de presencia total en un entorno artificial, como los proporcionados por RA y RV (Slater, 2024).

2.2.11. Entornos inmersivos:

Habilidades necesarias para desenvolverse en contextos cambiantes e interconectados, como la colaboración, el pensamiento crítico, la creatividad, la alfabetización digital y la comunicación (Partnership for 21st Century Skills, 2024).

2.3. Justificación

La presente investigación se justifica por la necesidad urgente de mejorar el desarrollo de las habilidades básicas del pensamiento computacional en estudiantes de educación media en contextos vulnerables, como es el caso de la Institución Educativa Pablo Neruda. Esta necesidad está respaldada por evidencias empíricas que muestran bajos niveles de desempeño en evaluaciones como el desafío Bebras (Ecos del Cobeima, 2025), así como por brechas estructurales y formativas en el sistema educativo nacional (MinTIC, 2024). La propuesta cobra relevancia al articularse con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, particularmente el ODS 4 (Educación de Calidad) y el ODS 9 (Industria, Innovación e Infraestructura), los cuales promueven una educación inclusiva y de calidad, e incentivan la innovación como motor del desarrollo (Naciones Unidas, 2023).

El desarrollo del pensamiento computacional (PC) en Colombia enfrenta desafíos significativos, evidenciados por los bajos resultados obtenidos en el desafío Bebras en los años recientes: 5.97 % en 2022, 6.92 % en 2023 y 4.67 % en 2024 (Ecos del Cobeima, 2025). A nivel institucional, los avances logrados han sido limitados, ubicándose la mayoría de las dimensiones evaluadas en los niveles 1A, 1B y 2A/2B (MinTIC, 2024). Esta situación se ve agravada por brechas significativas en el acceso a tecnologías de la información y la comunicación, la escasa capacitación docente, y la falta de acciones concretas para abordar las desigualdades de género y rendimiento en áreas STEM (Colnodo, 2024; Ministerio TIC, 2024). Todo ello impacta negativamente en la preparación académica y las oportunidades futuras de los estudiantes (Weintrop et al., 2024).

La integración de tecnologías emergentes, como la realidad virtual (RV) y la realidad aumentada (RA), permite construir entornos inmersivos que potencian el aprendizaje significativo, la motivación y el desarrollo de habilidades cognitivas superiores (Cabero, Ortiz y Llorente, 2022). Estas herramientas se alinean con las necesidades del estudiantado, que según

el diagnóstico institucional, manifiesta desinterés por asignaturas clave como matemáticas y tecnología (PEI, 2023). De igual forma, su implementación se inscribe en una tendencia global de innovación educativa que responde a los desafíos del siglo XXI, promoviendo competencias digitales y de pensamiento crítico fundamentales para la ciudadanía y empleabilidad futura (Weintrop et al., 2024). En este sentido, el proyecto busca generar evidencia científica sobre el impacto de estas tecnologías en la formación del pensamiento computacional, aportando conocimiento útil para la toma de decisiones pedagógicas, el diseño de políticas públicas y la transformación de las prácticas docentes en contextos similares.

Para abordar este problema de manera efectiva, es necesario implementar estrategias pedagógicas innovadoras que integren tecnologías emergentes, como la realidad aumentada, la realidad virtual y la gamificación, en el proceso de enseñanza-aprendizaje. Estas herramientas, alineadas con la filosofía humanista de la Institución Educativa Pablo Neruda, tienen el potencial de mejorar el interés académico y fortalecer el desarrollo del pensamiento computacional.

Este proyecto doctoral tiene como objetivo contribuir al logro del Objetivo de Desarrollo Sostenible 4 (Educación de Calidad) y 9 (Industria, Innovación e Infraestructura), promoviendo una educación más accesible y de mayor calidad para los estudiantes, así como vinculando las tecnologías emergentes al proceso de aprendizaje. Asimismo, busca fortalecer las habilidades en tecnologías de la información y la comunicación (TIC), reconociendo su papel clave en el desarrollo educativo. El acceso a una educación de calidad permite a las personas romper el ciclo de la pobreza, superar limitaciones económicas, mejorar los resultados del aprendizaje y reducir las tasas de abandono escolar (Naciones Unidas, 2023).

Como se muestra en la Figura 4, el siguiente diagrama de espina de pescado ilustra de forma estructurada las principales causas que explican el bajo desarrollo del pensamiento computacional. Este recurso visual permite categorizar factores como las condiciones familiares y sociales, las limitaciones tecnológicas, las brechas pedagógicas y las prácticas educativas tradicionales, facilitando así la comprensión integral de los obstáculos que enfrentan los estudiantes para desarrollar competencias clave en esta área.

2.4. Pregunta de investigación

¿Cuál es el efecto de un entorno educativo mediado por tecnologías emergentes, como la realidad virtual y aumentada, en el fortalecimiento de las habilidades básicas del pensamiento computacional en estudiantes de educación media de la Institución Educativa Pablo Neruda, Medellín?

2.5. Objetivo

Analizar el efecto de un entorno educativo mediado por tecnologías emergentes, tales como realidad virtual y aumentada, en el fortalecimiento de las habilidades básicas del pensamiento computacional en estudiantes de educación media de la Institución Educativa Pablo Neruda, Medellín.

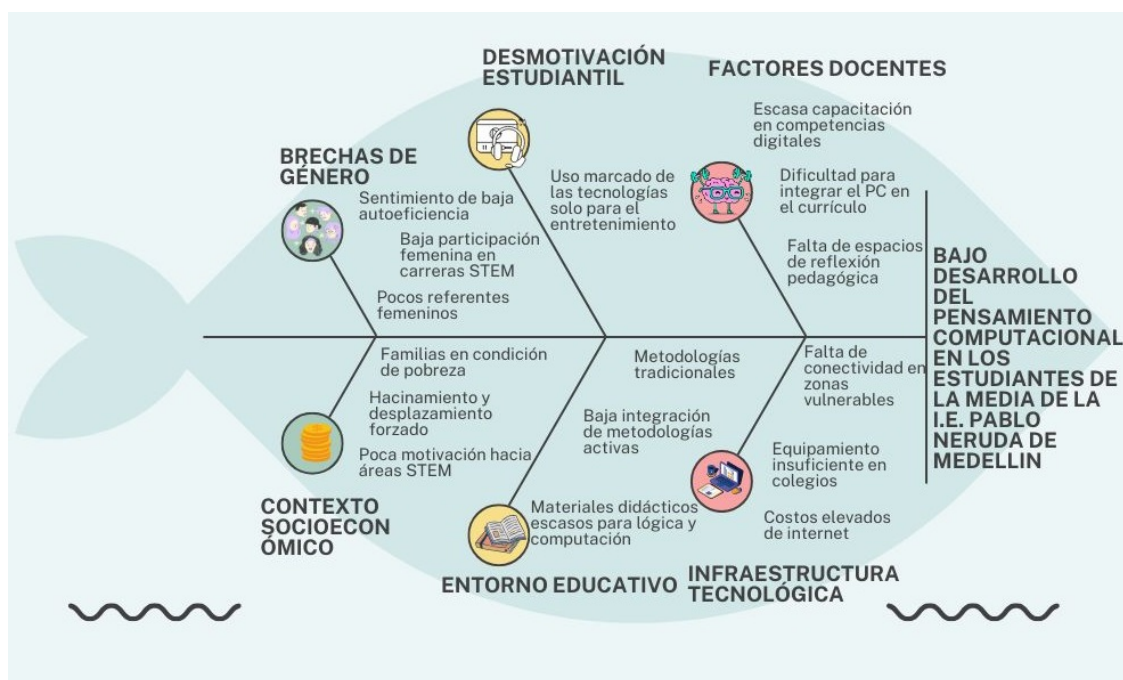


Figura 4: Diagrama de causa-efecto: factores que inciden en el bajo desarrollo del P.C en los estudiantes. Fuente: elaboración propia.

2.6. Hipótesis

La implementación de un entorno educativo mediado por tecnologías emergentes, como la realidad virtual y aumentada, tiene un efecto positivo en el fortalecimiento de las habilidades básicas del pensamiento computacional en estudiantes de educación media de la Institución Educativa Pablo Neruda, Medellín.

3. Conclusiones

En conclusión, el contexto institucional y nacional evidencia una necesidad crítica de intervención pedagógica innovadora para el fortalecimiento del pensamiento computacional. La integración de tecnologías emergentes como la realidad aumentada y virtual representa una oportunidad estratégica para transformar los procesos educativos en contextos vulnerables, alineándose con estándares internacionales de calidad e inclusión educativa. Esta investigación busca contribuir a dicho propósito mediante la construcción de evidencia sobre el impacto de dichas tecnologías en la formación de competencias clave para el siglo XXI.

Referencias

Referencias

- Acosta, C. (2023). Estudio señala que el 79,8% de colegios rurales en Colombia no tiene internet. *El Colombiano*. <https://www.elcolombiano.com/colombia/educacion/estudio-senala-que-cuatro-de-cada-cinco-colegios-rurales-en-colombia-no-tiene-internet-EA22559508>
- Bernal, A. (2024). La gamificación como Estrategia Pedagógica en la Educación Matemática. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 8. <https://ciencialatina.org/index.php/cienciala/article/view/11834/17237>
- Bordignon, F., & Iglesias, A. (2020). Introducción al pensamiento computacional. Universidad Pedagógica Nacional. Ministerio de Educación de Argentina - Educar. <https://biblioteca-repositorio.clacso.edu.ar/bitstream/CLACSO/2379/1/introduccion-pensamiento-computacional.pdf>
- British Council. (2021). Brechas de género en el pensamiento computacional. Gobierno de Colombia. https://mintic.gov.co/colombiaprograma/847/articles-399136_recurso_1.pdf
- Cabero Almenara, J., Valencia-Ortiz, R., & Llorente-Cejudo, C. (2022). Ecosistema de tecnologías emergentes: realidad aumentada, virtual y mixta. *Tecnología, Ciencia y Educación*, 23, 7–22. <https://doi.org/10.51302/tce.2022.1148>
- Colnodo. (2024). Día de las Niñas en las TIC 2024: Fomentando el acceso, la inclusión y la educación en Colombia. <https://colnodo.apc.org/es/NOTAS/dia-de-las-ninas-en-las-tic-2024-fomentando-el-acceso-la-inclusion-y-la-educacion-en-colombia>
- Ecos del Cobeima. (2025). Resultados del desafío Bebras en Colombia. <https://www.ecosdelcobeima.com/educacion/nota-205474>
- Fad Juventud. (2022). La falta de tiempo del profesorado y la baja competencia digital de las familias, los grandes lastres para incorporar las TIC en la enseñanza. https://fad.es/notas-de-prensa/la-falta-de-tiempo-del-profesorado-y-la-baja-competencia-digital-de-las-familias-los-grandes-lastres-para-incorporar-las-tic-en-la-ensenanza/?utm_source=chatgpt.com
- InnovaSchools. (2025). Limitaciones de la educación tradicional en Colombia. <https://blog.innovaschools.edu.co/limitaciones-de-la-educacion-tradicional-en-colombia>
- Institución Educativa Pablo Neruda. (2023). Proyecto Educativo Institucional (PEI) [Documento no publicado].
- Labanda, M., Coloma, M., & Espinosa, W. (2021). Pertinencia en el uso de las tecnologías emergentes en la gerencia. *Revista Honoris Causa*, 13. <https://revista.uny.edu.ve/ojs/index.php/honoris-causa/article/view/46/55>
- Méndez, O., & Bermúdez, J. (2023). El pensamiento computacional como competencia para el siglo XXI. *Ciencia Latina Internacional*, 7(4). <https://ciencialatina.org/index.php/cienciala/article/view/7044/10703>
- Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones [MinTIC]. (2024). Mi nodo en cifras: Resultados institucionales del programa Colombia Programa. <https://mintic.gov.co/colombiaprograma/847/w3-article-399170.html>

- Naciones Unidas. (2023). Objetivos de Desarrollo Sostenible: Educación de calidad (ODS 4) y desarrollo industrial (ODS 9). <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>
- Ortega, B., & Asensio, M. (2018). Robótica DIY: pensamiento computacional para mejorar la resolución de problemas. RELATEC. Revista Latinoamericana de Tecnología Educativa, 17(2). https://dehesa.unex.es/bitstream/10662/8767/1/1695-288X_17_2_129.pdf
- Prendes, M. P., & Cerdán, F. (2021). Tecnologías avanzadas para afrontar el reto de la innovación educativa. Revista Iberoamericana de Educación a Distancia, 24. <https://www.redalyc.org/journal/3314/331464460002/331464460002.pdf>
- Rodriguez, D. (2023). Un informe del Dane dice que de cada 10 hogares del país, cuatro no tienen internet. La República. <https://www.larepublica.co/economia/un-informe-del-dane-dice-que-de-cada-10-hogares-del-pais-cuatro-no-tienen-internet-3666477>
- Rojas, S., & Aravena, M. (2023). Pensamiento computacional (PC) en la educación: aprendizajes y desempeño académico. Revista Franz Tamayo, 5(13). <https://portal.amelica.org/ameli/journal/591/5914241001/html/>
- Salcedo, A., & Pain, O. (2023). Uso de las TIC para la enseñanza en docentes universitarios. MAGIS, 16(2023). <https://revistas.javeriana.edu.co/files-articulos/MAGIS/16%282023%29/6942624023>
- Salinas, Y. (2022). El impacto del internet de todas las cosas (IoT) en la vida cotidiana. Ciencia Latina Revista Multidisciplinar, 6. <https://ciencialatina.org/index.php/cienciala/article/view/1959/3253>
- Suaza, J., Hurtado, C., & González, E. (2022). Análisis de resultados del desafío internacional Bebras Colombia 2022. Revista EIA, 21(42), Reia4209, 1–24. <https://revistas.eia.edu.co/index.php/reveia/article/view/1733/1597>
- Telefónica. (2023). ¿Qué son las tecnologías disruptivas y qué ventajas tienen? <https://www.telefonica.com/es/sala-comunicacion/blog/que-son-las-tecnologias-disruptivas-y-que-ventajas-tienen/>
- TIC. (2024). Mi nodo en cifras 2024. <https://drive.google.com/drive/folders/1p4NGXKLyuvvGE3lIpUgRVXU32agnXxWg>
- Vanegas, V., Barragán, J., & Barreto, C. (2024). Pobreza digital, una nueva perspectiva para fortalecer la inclusión social en Colombia. Departamento Nacional de Planeación y Desarrollo. <https://www.dnp.gov.co/publicaciones/Planeacion/Paginas/pobreza-digital-una-nueva-perspectiva-para-fortalecer-la-inclusion-social-en-colombia.aspx>
- Vergara, K. (2024). La importancia del pensamiento computacional fuera de la clase de tecnología. Red de Innovación para la Transformación Educativa. <https://www.redinnovacioneducativa.cl/columnas-de-opinion/la-importancia-del-pensamiento-computacional-fuera-de-la-clase-de-tecnologia>

Arquitectura Modular Basada En Machine Learning Para La Enseñanza De IA a Estudiantes De Educación Básica Secundaria En Medellín con Enfoque de Género

Juan Pablo Rivera Barrera¹, Henry Omar Sarmiento Maldonado², Carmen Amelia Camacho Sanabria³,

Resumen

En el contexto actual de transformación digital y economías basadas en ciencia de datos e inteligencia artificial (IA), la formación temprana en estas áreas es una prioridad estratégica para países que buscan soberanía tecnológica y talento calificado. Naciones como Alemania, Corea del Sur y Reino Unido han integrado la IA en sus currículos escolares, formación docente y plataformas educativas. Colombia, en cambio, carece de currículos oficiales en este campo y enfrenta limitaciones como escasa disponibilidad de herramientas técnicas, baja capacitación docente y reducida participación femenina en áreas STEM. Esta tesis doctoral propone diseñar y validar una arquitectura modular basada en aprendizaje automático (Machine Learning, ML) para enseñanza de IA en educación básica secundaria (EBS), con un enfoque en la inclusión de niñas. Se desarrollarán herramientas de acceso libre que oculten la complejidad algorítmica y permitan a estudiantes sin experiencia previa construir aplicaciones inteligentes mediante bloques funcionales de código abierto. La propuesta se alinea con el Plan Nacional de Desarrollo de Colombia (2022–2026) y adopta el enfoque metodológico de Design-Based Research (DBR), estructurado en cuatro fases iterativas: análisis contextual y revisión sistemática, diseño de bloques funcionales de ML, implementación de una plataforma educativa con interfaz adaptativa y validación mediante pruebas piloto con estudiantes en una institución pública de Medellín. Este trabajo fortalece el sistema educativo en Colombia con soluciones técnicas abiertas, escalables y contextualizadas.

Palabras clave: Enseñanza de IA, IA para educación básica, Inteligencia artificial, Inclusión de niñas en STEM, Alfabetización en IA

Abstract

In the current context of digital transformation and economies based on artificial intelligence (AI) and data science, early education in these fields has become a strategic priority for countries aiming to achieve technological sovereignty and develop highly qualified talent. Nations such as Germany, South Korea, and the United Kingdom have integrated AI into their school curricula, teacher training programs, and specialized educational platforms. Colombia, by contrast, lacks official curricula in this field and faces limitations such as low availability of technical tools, insufficient teacher training, and limited female participation in STEM areas. This doctoral thesis proposes the design and validation of a modular architecture based on Machine Learning (ML) for teaching AI in lower secondary education

¹ juanprivera@elpoli.edu.co - Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid

² hosarmiento@elpoli.edu.co - Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid

³ carmen.camacho@caroycuervo.gov.co - Instituo Caro y Cuervo

(EBS), with a focus on promoting the inclusion of girls. It will develop open-access tools that abstract algorithmic complexity, enabling students with no prior programming experience to build intelligent applications through functional open-source code blocks. The proposal aligns with Colombia's National Development Plan (2022–2026) and adopts the Design-Based Research (DBR) methodology, structured into four iterative phases: contextual analysis and systematic literature review, design of ML functional blocks, implementation of an educational platform with an adaptive interface, and validation through pilot testing with students in a public school in Medellín. This work aims to strengthen Colombia's educational system through open, scalable, and context-sensitive technical solutions.

1. Planteamiento del Problema

En el contexto global de transformación digital, la IA se consolida como tecnología clave para el desarrollo económico, científico y social. Frente a esto el [Ministerio de Educación Nacional de Colombia \(2022\)](#) plantea la necesidad de formar a las nuevas generaciones en competencias del siglo XXI. Por su parte, la [UNESCO \(2022\)](#) destaca que educar a los jóvenes en tecnologías basadas en IA permitirá consolidar la soberanía tecnológica y competir en la economía digital. Por ello, países como Alemania, Corea del Sur, Reino Unido y China han implementado políticas públicas para enseñar IA desde la educación básica, con currículos estandarizados, formación docente y herramientas pedagógicas adaptadas ([UNESCO, 2022](#)).

Colombia, sin embargo, no cuenta con currículos oficiales en IA para EBS y enfrenta limitaciones como baja formación docente, escasez de herramientas y desigualdad de género en STEM ([FEDESOFIT, 2024](#); [Michael Page, 2023](#)). Aunque el sector software crece, persiste una brecha entre oferta y demanda de talento en IA. En 2022, solo había 7.486 profesionales en el área, el 22 % en tecnología, con menor proporción especializada en IA ([Michael Page, 2023](#)). Además, el 71 % de las empresas forma internamente a su personal en IA, y solo el 25 % colabora en este sentido con instituciones educativas ([FEDESOFIT, 2024](#)). La baja participación femenina en STEM agrava el panorama: apenas el 17 % de profesionales STEM son mujeres ([Michael Page, 2023](#)). Aunque ha aumentado su presencia en programas académicos (del 27,3 % en 2017 al 31,5 % en 2021), aún persiste la brecha ([Bayona Rodríguez, 2023](#)). Según la OCDE, la [UNESCO \(2019\)](#) y otros expertos, urge implementar políticas educativas con enfoque de género ([Agrawal et al., 2024](#); [Laboratorio de Economía de la Educación, 2024](#)). Una de las causas del problema es la forma en que se introduce la tecnología desde la escuela. Muchos estudiantes no tienen contacto con la IA, y cuando lo hacen, es en entornos poco motivantes o con sesgos de género que afectan más a las niñas ([Acosta Valdeleón, 2024](#); [Bayona Rodríguez, 2023](#); [Castro y Rico, 2022](#)). Esto limita su interés en carreras relacionadas y refuerza desigualdades existentes.

El Plan Nacional de Desarrollo 2022–2026 propone consolidar una economía del conocimiento, cerrar brechas tecnológicas y de género, y formar talento desde la escuela ([de Planeación \(DNP\), 2023](#)). Pero según la [UNESCO \(2022\)](#), solo 29 de 193 países cuentan con currículos estructurados de IA, y Colombia no está entre ellos. Además, hay escasez de herramientas pedagógicas abiertas, accesibles y contextualizadas ([Lao, 2020](#)). En Medellín existen programas escolares de software ([Cano Vásquez y Ángel Uribe, 2020](#)), pero no incluyen contenidos sobre IA ni estrategias con enfoque de género. Medellín representa un escenario clave para diseñar

programas de alfabetización en IA con inclusión. Sin embargo, la falta de herramientas que combinen aspectos técnicos, pedagógicos y de género limita su implementación. Los docentes carecen de medios para enseñar IA sin programación avanzada, y los currículos no estimulan el interés de las niñas. Por tanto, se plantea como problema central la ausencia de programas sistemáticos y herramientas técnicas abiertas, públicas y modulares para enseñar IA en EBS en Medellín, que además integren enfoques pedagógicos y de género. La pregunta de investigación es: ¿Cómo desarrollar herramientas técnicas accesibles, adaptativas y libres para enseñar IA en EBS, que apoyen al docente y fomenten la participación de niñas en el desarrollo de estas tecnologías?

2. Objetivos

2.1. Objetivo General

Desarrollar una arquitectura modular basada en Machine Learning para la enseñanza de inteligencia artificial en educación básica secundaria en Medellín, mediante el uso de bloques de código abierto ensamblables y un marco pedagógico, con el fin de fomentar la participación de niñas y superar las barreras asociadas al dominio de algoritmos matemáticos y programación avanzada.

2.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar herramientas para enseñanza de IA en educación básica secundaria mediante una revisión de la literatura a nivel mundial en este campo, para la selección de aquellas herramientas susceptibles de ser adaptadas y contextualizadas al caso Medellín.
- Apropiar un marco metodológico para la enseñanza de asuntos stem mediante el análisis y selección de metodologías y enfoques educativos aplicados al desarrollo de bloques de código abierto en enseñanza de IA, para dar lineamientos al diseño técnico y pedagógico tanto de las herramientas como de la plataforma que se implemente.
- Desarrollar bloques de código abierto basados en Machine Learning mediante el diseño de una arquitectura modular que encapsule código y algoritmos matemáticos de IA en unidades funcionales a manera de bloques reutilizables para ser usados en la enseñanza de IA con un enfoque orientado a motivar la participación de niñas.
- Implementar una plataforma que integre los bloques para enseñanza de IA en una arquitectura modular, a través del diseño de una interfaz intuitiva y adaptativa, para la generación de un entorno de aprendizaje que estimule el interés y la permanencia de niñas.
- Evaluar la usabilidad y la escalabilidad de la plataforma mediante pruebas experimentales, validaciones técnicas y medición de su impacto en una institución educativa pública de la ciudad de Medellín, con el fin de valorar su efectividad en la enseñanza de IA y su potencial para contribuir a la reducción de barreras de género en STEM.

3. Justificación

Los sistemas de IA permiten hoy una interacción autónoma y segura con los entornos físicos, lo que ha llevado a su adopción creciente por empresas y a su presencia cotidiana en la vida de las personas. Esta expansión ha generado preocupaciones sobre el reemplazo de empleos de mediana y baja cualificación (UNESCO, 2022; Kim y Shakya, 2023) y plantea interrogantes éticos, sociales y políticos. El Consenso de Beijing (UNESCO, 2019) afirma que la IA debe ser ética, centrada en las personas y evaluada durante toda su cadena de valor. Por ello, diversos países han comenzado a incorporar su enseñanza desde la educación básica (UNESCO, 2022; Wu, 2022).

Es importante distinguir entre el uso de IA como herramienta pedagógica (Madathil et al., 2023; Song y Wang, 2020; Zafari et al., 2022), la alfabetización en IA (centrada en el uso ético y responsable de estas tecnologías (Pesek, Nosović, y Krašna, 2022)), y la enseñanza para el desarrollo de aplicaciones y sistemas basados en IA (Wu, 2022). Esta tesis se orienta al último enfoque, proponiendo herramientas accesibles y con enfoque de género para enseñar a estudiantes a construir tecnologías basadas en IA. El Ministerio de Educación Nacional de Colombia (2022) define competencias como combinaciones de conocimientos, actitudes y habilidades para actuar en contextos complejos. Definir competencias para IA implica identificar qué deben saber los estudiantes, cómo aplicar ese conocimiento y en qué situaciones hacerlo de forma ética y socialmente útil. Por ello diversos enfoques metodológicos han sido propuestos para enseñar IA en la escuela (Fujita et al., 2023; Roopaei y Roopaei, 2024; Kim y Shakya, 2023).

UNESCO (2022) identifica tres marcos curriculares clave: Long y Magerko (2020), AI4K12 (2024) y Lao (2020), a los que se suman otros como AIM (Kandlhofer et al., 2019), AI Builders (Polpanumas et al., 2021), y el marco de alfabetización crítica (Saddhono, Suhita, Rakhmawati, Rohmadi, y Sukmono, 2024). Pese a avances, muchas herramientas son cerradas, no reutilizables y sin enfoque de género (Kim y Shakya, 2023). En Colombia, la ausencia de políticas públicas, brechas tecnológicas, deficiencias en competencias básicas y falta de formación docente dificultan la implementación (Cai, Youngstrom, y Zhang, 2023; Lipovec, 2024).

Esta tesis propone bloques funcionales de código abierto basados en ML, que permitan construir aplicaciones sin conocimientos previos en programación, orientados a la participación femenina. Aunque no busca definir un currículo nacional, sí se basa en referentes internacionales para desarrollar una arquitectura modular alineada con competencias clave y validada mediante piloto en Medellín. Con base en los análisis de UNESCO (2022), el mapeo hecho por Kim y Shakya (2023), y la información aportada por sitios web de ministerios de educación (Ariyaratna y Rajapakse, 2024; Zafari et al., 2022), se hace un mapeo de currículos y se seleccionarán marcos pertinentes para diseñar soluciones técnicas educativas con enfoque de género, contribuyendo a la reducción de la brecha digital en Colombia. La Tabla 1 presenta un resumen del mapeo de los currículos oficiales con respaldo gubernamental, resultados de aprendizaje específicos en IA para educación básica y media, y aplicabilidad internacional.

En la Figura 1 se presenta un mapa que muestra los países que han desarrollado currículos para la enseñanza del desarrollo de tecnologías basadas en IA en educación secundaria. Solo se incluyen aquellos con respaldo gubernamental reportado, clasificados según el tiempo de implementación en las aulas. La imagen destaca que ningún país de América Latina o África

ha informado oficialmente sobre la adopción de programas gubernamentales de alfabetización en IA en educación básica, concentrándose estos esfuerzos en regiones como Norteamérica, Europa y Asia.

Tabla 1: Países con currículos de IA para educación básica soportados por políticas gubernamentales

País	Estado de Implementación	Política Pública Implementada	Primaria	Básica Secundaria	Media
Alemania (Renania del Norte-Westfalia)	Recientemente implementado	En desarrollo	No	Sí	Sí
Alemania (Baviera)	Implementado	Implementado	Sí	Sí	Sí
Alemania (Baden-Wurtemberg)	Implementado	En desarrollo	Sí	Sí	Sí
Arabia Saudita	Implementado	Implementado	Sí	Sí	Sí
Armenia	Recientemente implementado	Implementado	No	No	Sí
Austria	Implementado	Implementado	No	No	Sí
Bélgica	Implementado	Implementado	No	No	Sí
Bulgaria	Implementado	Implementado	Sí	Sí	Sí
Chipre	Pruebas piloto	En desarrollo	No	Sí	Sí
China	Implementado	Implementado	Sí	Sí	Sí
Croacia	Pruebas piloto	En desarrollo	No	Sí	Sí
Dinamarca	Implementado	Implementado	No	Sí	Sí
Emiratos Árabes Unidos	Implementado	Implementado	Sí	Sí	Sí
Eslovaquia	Implementado	Implementado	No	No	Sí
Eslovenia	Implementado	Implementado	No	Sí	Sí
España	Implementado	Implementado	Sí	Sí	Sí
Estonia	Implementado	Implementado	No	Sí	Sí
Finlandia	Implementado	Implementado	Sí	Sí	Sí
Francia	Implementado	Implementado	Sí	Sí	Sí
Grecia	Pruebas piloto	En desarrollo	No	Sí	Sí
Holanda	Implementado	Implementado	No	No	Sí
Hungría	Implementado	Implementado	Sí	Sí	Sí
India	Implementado	Implementado	No	Sí	Sí
Irlanda	Pruebas piloto	En desarrollo	No	No	Sí
Italia	Pruebas piloto	En desarrollo	Sí	Sí	Sí
Jordania	Implementado	Implementado	No	Sí	Sí

País	Estado de Implementación	Política Pública Implementada	Primaria	Básica Secundaria	Media
Kuwait	Implementado	Implementado	Sí	Sí	Sí
Latvia	Implementado	Implementado	No	No	Sí
Lituania	Implementado	Implementado	No	Sí	Sí
Luxemburgo	Implementado	Implementado	No	Sí	Sí
Malta	Implementado	Implementado	No	Sí	Sí
Noruega	Implementado	Implementado	No	Sí	Sí
Polonia	Implementado	Implementado	No	No	Sí
Portugal	Implementado	Implementado	Sí	Sí	Sí
Qatar	Implementado	Implementado	Sí	Sí	Sí
República Checa	Pruebas piloto	En desarrollo	No	Sí	Sí
República de Corea	Implementado	Implementado	No	No	Sí
Rumania	Pruebas piloto	En desarrollo	No	No	Sí
Serbia	Implementado	Implementado	No	Sí	Sí
Singapur	Implementado	Implementado	Sí	Sí	Sí
Suiza	Implementado	Implementado	No	Sí	Sí

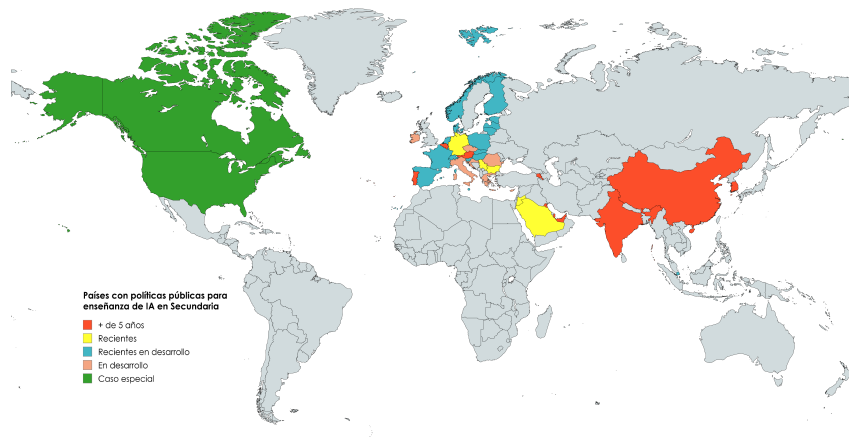


Figura 1: Países con políticas públicas para enseñanza de IA en educación básica. Fuente: elaboración propia

Diversas industrias han promovido currículos no gubernamentales para enseñar IA en educación básica, ante la creciente demanda de talento en tecnologías emergentes. Estas iniciativas, sin vínculos oficiales con gobiernos ni contextos territoriales, ofrecen modelos universales que enfrentan desafíos de adaptación cultural. Entre las más destacadas están Open P-Tech: SkillsBuild for Students de IBM, con material en línea para secundaria y formación técnica

([IBM, 2022](#)); Machine Learning for Kids, también de IBM, dirigida a primaria y secundaria baja ([Lane, 2018](#)); MagIA Juvenil y AI for Good Challenge de Microsoft, enfocadas en jóvenes hispanohablantes de 15 a 18 años, con contenidos formativos y retos sociales ([Microsoft, 2023, 2024](#)); AI for Youth de Intel, que aborda habilidades técnicas y sociales ([Intel, 2022](#)); Daily-AI Learning for Youth del MIT, con enfoque ético ([Massachusetts Institute of Technology, 2020](#)); y AI4K12 de Carnegie Mellon University, basado en cinco ideas fundamentales para la enseñanza de IA desde primaria ([AI4K12, 2024](#)). Aunque estas plataformas suelen ser gratuitas y web embebidas, presentan limitaciones para su adaptación técnica y cultural a contextos como el colombiano.

Por ello, este trabajo adopta como criterio de selección la posibilidad de contextualizar dichas herramientas al caso Medellín, incorporando una perspectiva de género centrada en niñas. A pesar de esfuerzos globales, persisten desigualdades de género en STEM ([Negrier, Hochstetter, Vásquez, y Martínez, 2023](#); [Sánchez-Jiménez, Guerrero-Castillo, Guerrero-Bote, Halevi, y De-Moya-Anegón, 2024](#); [Yepes Zuluaga y Granada, 2023](#)), lo que hace urgente incluir estrategias inclusivas en el diseño de herramientas para la enseñanza de IA.

4. Marco Conceptual Para La Enseñanza De IA a Estudiantes De Educación Básica

La educación en IA y ML avanza de forma desigual: su presencia en educación básica es aún incipiente ([Kandlhofer et al., 2019](#)), con baja estandarización curricular, acceso limitado en contextos vulnerables y dependencia de iniciativas aisladas más que de políticas públicas ([Lai et al., 2025](#); [Pineda, Ashar, y Liu, 2024](#); [Williams, 2024](#)). Por este motivo es necesario establecer un marco de referencia para definir las estrategias que se definan a lo largo de este trabajo como criterios de desarrollo de las herramientas para enseñanza de IA que se proponen.

4.1. Inteligencia Artificial y Machine Learning: Conceptos y Definiciones

La presente investigación adopta la definición de Norvig y Russell, quienes entienden la IA como el estudio de agentes que perciben su entorno y actúan para maximizar su éxito ([Norvig y Russell, 2020](#)), destacando agentes, percepción y acción. Dentro de la IA se incluye el ML, subcampo que permite a los sistemas aprender a partir de datos, junto a sistemas expertos, algoritmos de búsqueda y razonamiento lógico ([Tedre et al., 2021](#)).

4.2. Teorías Educativas Aplicadas a la Enseñanza de IA

La enseñanza de IA en educación básica requiere marcos que integren aspectos cognitivos, sociales y motivacionales. Este estudio se basa en el constructivismo cognitivo (Piaget, Bruner) y social (Vygotsky), destacando la construcción activa del conocimiento y la zona de desarrollo próximo (ZDP) ([Schunk, 2012](#); [Vygotsky, 1978](#)). Se integran también principios del conectivismo (Siemens, Downes), que concibe el aprendizaje como conexión con redes y recursos digitales ([Corbett y Spinello, 2020](#); [Siemens, 2005](#)), y el concepto de autoeficacia de Bandura, clave para fomentar la confianza de las niñas mediante retos progresivos y retro-

alimentación visible, promoviendo su persistencia frente a desafíos técnicos en IA (Bandura, 1997; Tek, Benli, y Deveci, 2018).

4.3. Marcos Educativos en Computación e Ingeniería

El diseño de herramientas basadas en ML para enseñar IA en EBS con enfoque de género exige un marco educativo centrado en competencias, entendidas como combinaciones de saberes, habilidades y actitudes (Ministerio de Educación Nacional de Colombia, 2022). Estas deben guiar el diseño técnico y curricular. Se proponen enfoques como problemas reales (Fujita et al., 2023), gamificación (Roopaei y Roopaei, 2024) o modelos cognitivos como los gráficos de conocimiento (Kim y Shakya, 2023). La UNESCO (2022) ha identificado tres marcos curriculares clave para esta alfabetización: 1. Alfabetización en IA: Long y Magerko proponen 17 competencias y 15 recomendaciones pedagógicas, centradas en niveles cognitivos básicos y estrategias de apropiación gradual (Long y Magerko, 2020). 2. AI4K12: Iniciativa de AAAI, CSTA y AI4ALL que organiza cinco ideas clave de la IA en cuatro etapas educativas, con conceptos y componentes específicos por grado (AI4K12, 2024). 3. Marco Educativo del ML: Propuesto por Lao, articula pensamiento computacional y constructivismo, distribuyendo conocimientos en cuatro áreas, habilidades en seis cursos, y actitudes evaluables mediante criterios estandarizados (Lao, 2020).

5. Métodos y Procedimientos

Esta investigación se desarrolla bajo el enfoque metodológico de la Investigación Basada en Diseño (Design-Based Research, DBR), (Crepon, 2014) dentro de un paradigma pragmático y aplicado. Este enfoque permite diseñar, implementar y evaluar soluciones tecnológicas contextualizadas, centradas en la enseñanza de IA en EBS. El diseño metodológico es mixto, combinando métodos cuantitativos (pretest, posttest, escalas de motivación, métricas de uso) y cualitativos (entrevistas, observaciones y grupos focales), lo cual permite medir el impacto educativo y explorar percepciones y barreras. La investigación se organiza en cuatro fases iterativas: 1. Análisis contextual: revisión sistemática de literatura sobre enseñanza de IA en EBS y diagnóstico de barreras de género en Medellín, para definir criterios de diseño de los bloques funcionales. 2. Diseño de la solución: desarrollo y prototipado de bloques de código abierto con funciones de ML y principios pedagógicos accesibles. 3. Implementación: creación de una interfaz adaptativa UX/UI para integrar los bloques en una plataforma funcional, con pruebas piloto en una institución pública. 4. Evaluación: análisis empírico del impacto en comprensión de IA, habilidades técnicas, motivación hacia STEM, y usabilidad.

Se contempla un modelo de variables: independiente (uso de la plataforma) y dependientes (comprensión conceptual, habilidades, motivación, usabilidad y permanencia). Variables intervinientes como edad, género y experiencia previa también son consideradas. La investigación tiene un carácter explicativo y cuasi-experimental, con aplicación real y valor transferible para política educativa y diseño instruccional.

Se emplea una combinación de técnicas, incluyendo revisión sistemática (Kitchenham), análisis documental, programación modular en Python y JavaScript, diseño de interfaces en

Figma, pruebas piloto y triangulación de datos, tomando como referencia estudios previos como los de [Lao \(2020\)](#) y [Williams \(2024\)](#). La revisión sistemática de literatura (RSL) sigue el protocolo de Kitchenham ([Kitchenham, 2004](#)), estructurado en tres fases: planificación, ejecución y conclusiones. En la fase de planificación se formularon cuatro preguntas de investigación centradas en herramientas para la enseñanza de IA en educación básica, con atención a simplificación algorítmica, accesibilidad, género y respaldo gubernamental. Se diseñó una estrategia de búsqueda con operadores booleanos aplicada en cinco bases de datos: IEEE Xplore, ScienceDirect, Scopus, Redalyc y Google Scholar. Mediante criterios de inclusión/exclusión definidos (2015–2025), se filtraron 1.416 documentos iniciales, seleccionando finalmente 70 estudios relevantes: 50 en journals, 42 en congresos, 4 tesis doctorales y 4 informes institucionales.

6. Impactos Esperados

En el plano educativo, la creación de herramientas modulares y abiertas permitirá que estudiantes y docentes accedan a contenidos de IA sin necesidad de dominar programación avanzada ni algoritmos matemáticos complejos. Estas herramientas facilitarán la enseñanza-aprendizaje de IA mediante bloques funcionales reutilizables, promoviendo el pensamiento computacional y la autonomía estudiantil. Con enfoque de género, el proyecto busca fomentar la participación de niñas en STEM, incorporando estrategias que fortalezcan la autoeficacia, la identificación con referentes femeninos y la permanencia frente a desafíos técnicos. Desde lo tecnológico, la solución será escalable, libre y adaptable a diversos contextos, respondiendo a necesidades de infraestructura y formación en escuelas públicas. El impacto social se traduce en una mayor inclusión de niñas en trayectorias formativas vinculadas al desarrollo de IA, con potencial para transformar sus horizontes vocacionales. Esta propuesta se articula con el Plan Nacional de Desarrollo de Colombia (2022–2026), que promueve la industria digital con equidad de género, y se alinea con los ODS 4 (educación de calidad) y 5 (igualdad de género). Además, se conecta con políticas públicas locales como “Medellín Ciudad Inteligente”. La implementación piloto en instituciones públicas permitirá validar su pertinencia, escalabilidad y capacidad de transformación educativa.

7. Componente de Innovación y Aporte a la Ciencia

El factor innovador de este trabajo está en el desarrollo de una arquitectura modular basada en ML para enseñar IA en EBS, promoviendo la participación de niñas en STEM. Su componente técnico introduce bloques de código abierto que simplifican la complejidad algorítmica, facilitando el aprendizaje de IA sin necesidad de conocimientos avanzados en programación ni matemáticas. Además, incorpora estrategias pedagógicas con enfoque de género que fortalecen la autoeficacia y la permanencia de las niñas en trayectorias tecnológicas. A nivel científico, contribuye al campo emergente de enseñanza de IA en EBS desde una perspectiva sociotécnica, generando insumos para políticas públicas. Esta propuesta ofrece soluciones educativas accesibles y contextualizadas, con potencial de escalabilidad en territorios con brechas estructurales como el colombiano.

Referencias

- Acosta Valdeleón, W. (2024). *Lineamientos para la enseñanza y el aprendizaje de stem profundo. una postura desde la escuela, la comunidad y el territorio*. Universidad de La Salle.
- Agrawal, S., Rathi, S., Chatterjee, C., y Higgins, M. J. (2024). Do stronger ipr incentivize female participation in innovation? evidence from chinese ai patents. *National Bureau of Economic Research Working Paper Series*(32547). doi: 10.3386/w32547
- AI4K12. (2024). *K-12 ai guidelines*. <https://ai4k12.org/>. (Retrieved October 2024)
- Ariyaratna, G. D. W. M., y Rajapakse, R. A. C. P. (2024, April). Teaching artificial intelligence in junior secondary education using an authentic approach: A qualitative evaluation of the grade six ai learning module in sri lanka. En *2024 international research conference on smart computing and systems engineering (scse)*.
- Bandura, A. (1997). *Self-efficacy: The exercise of control*. New York: W. H. Freeman and Company.
- Bayona Rodríguez, H. (2023). *Stem: una lucha en clave de género*. <https://www.mineducacion.gov.co/portal/micrositios-institucionales/Dia-de-la-Mujer-2023/414325:STEM-una-lucha-en-clave-de-genero>. (Ministerio de Educación Nacional, Colombia. Retrieved October 2024)
- Cai, Y., Youngstrom, D., y Zhang, W. (2023, December). Exploring approaches for teaching cybersecurity and ai for k-12. En *2023 ieee international conference on data mining workshops (icdmw)*.
- Cano Vásquez, L. M., y Ángel Uribe, I. C. (2020). *Medellín territorio stem+h: un diagnóstico de la secretaría de educación de medellín sobre el desarrollo del enfoque en las instituciones educativas de la ciudad*. Medellín: Universidad Pontificia Bolivariana - Alcaldía de Medellín.
- Castro, E., y Rico, N. (2022). El reto de alentar a las niñas a introducirse en campos stem. En O. Barcelona (Ed.), *Investigación en educación matemática* (pp. 117–133).
- Corbett, F., y Spinello, E. (2020). Connectivism and leadership: harnessing a learning theory for the digital age to redefine leadership in the twenty-first century. *Heliyon*, 6(1), e03250. doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e03250
- Crepon, R. (2014, October). Application of design research methodology to a context-sensitive study in engineering education. En *2014 ieee frontiers in education conference (fie) proceedings*. IEEE.
- de Planeación (DNP), D. N. (2023). *Plan nacional de desarrollo 2022 - 2026: Colombia, potencia mundial de la vida*. (Disponible en línea)
- FEDESFT. (2024). *Una fuerza aliada para la transformación: Esto es la ia para el sector de software y ti colombiano*. (Informe institucional)
- Fujita, Y., Ishihara, M., Ogino, T., Nakajima, T., Kambe, H., Inoue, M., y Koizumi, H. (2023, October). Ai education based on case studies and its practical evaluation using persona method in user experience design. En *2023 ieee 12th global conference on consumer electronics (gcce)*.
- IBM. (2022). *Open p-tech: Skillsbuild for students and educators*. <https://www.ptech.org/open-p-tech/>. (P-TECH, sin fecha exacta)

- Intel. (2022). *Enseñanza de ia en el aula*. <https://www.intel.la/content/www/xl/es/education/k12/teachers/teaching-ai.html>.
- Kandlhofer, M., Steinbauer, G., Laßnig, J. P., Baumann, W., Plomer, S., Ballagi, A., y Alfoldi, I. (2019, October). Enabling the creation of intelligent things: Bringing artificial intelligence and robotics to schools. En *2019 ieee frontiers in education conference (fie)*.
- Kim, D. H., y Shakya, R. (2023). A study on the curriculum design for k-12 ai education using knowledge graph. *European Journal of Science, Innovation and Technology*, 3(4), 515–531.
- Kitchenham, B. (2004). *Procedures for performing systematic reviews* (Inf. Téc. n.º 33). Keele, UK: Keele University.
- Laboratorio de Economía de la Educación. (2024). *Informe 86: El rol crucial de la niña y la mujer en la ciencia*. (Laboratorio de Economía de la Educación, Pontificia Universidad Javeriana)
- Lai, H., Peng, P., Lv, Y., Cai, P., Ma, Q., y Zhang, Z. (2025, March). The development of a collaborative learning tool for ai education: Corobolab. En *2025 14th international conference on educational and information technology (iceit)*.
- Lane, D. (2018). *Machine learning for kids*. <https://machinelearningforkids.co.uk/>.
- Lao, N. (2020). *Reorienting machine learning education towards tinkers and ml-engaged citizens* (Tesis Doctoral, Massachusetts Institute of Technology). Descargado de https://appinventor.mit.edu/assets/files/NatalieLao_PhD_Dissertation.pdf
- Lipovec, A. (2024, June). Charting the path forward: Effective didactic approach for teaching ai literacy in k-12 education. En *2024 13th mediterranean conference on embedded computing (meco)*.
- Long, D., y Magerko, B. (2020). What is ai literacy? competencies and design considerations. En *Proceedings of the 2020 chi conference on human factors in computing systems*. Honolulu, HI, USA. doi: 10.1145/3313831.3376727
- Madathil, N. T., Alrabaei, S., Al-kfairy, M., Damseh, R., y Belkacem, A. N. (2023, May). Ai in education: Improving quality for both centralized and decentralized frameworks. En *2023 ieee global engineering education conference (educon)*.
- Massachusetts Institute of Technology. (2020). *Daily curriculum*. <https://raise.mit.edu/daily/>.
- Michael Page. (2023). *Talento it: La era stem llega a américa latina*. (Publicado por Michael Page en Bogotá)
- Microsoft. (2023). *Magia juvenil, desarrollo de habilidades en programación e inteligencia artificial*. <https://sway.cloud.microsoft/e5vaHo6CYK2JrhFY?ref=Link>.
- Microsoft. (2024). *Ai for good lab*. <https://www.microsoft.com/en-us/research/group/ai-for-good-research-lab/>.
- Ministerio de Educación Nacional de Colombia. (2022). *Orientaciones curriculares para el Área de tecnología e informática en educación básica y media*.
- Negrier, M., Hochstetter, J., Vásquez, F., y Martínez, R. (2023). *Visibility of women in the software development life cycle / visibilidad de las mujeres en el ciclo de vida del desarrollo de software*. (Manuscrito no indexado)
- Norvig, P., y Russell, S. (2020). *Artificial intelligence: A modern approach* (4th ed.). Pearson.

- Pesek, I., Nosović, N., y Krašna, M. (2022, June). The role of ai in the education and for the education. En *2022 11th mediterranean conference on embedded computing (meco)*.
- Pineda, C. L., Ashar, A. A. K., y Liu, J. (2024, October). Fostering ai literacy: A survey of student perceptions and effective practices in k-12 machine learning. En *2024 ieee frontiers in education conference (fie)*.
- Polpanumas, C., Limkonchotiwat, P., Matupumanon, B., Chaksangchaichot, C., Chumlek, N., Phaphoom, N., y Achakulvisut, T. (2021, December). Ai builders: Teaching thai students to build end-to-end machine learning projects online. En *2021 ieee international conference on engineering, technology & education (tale)*.
- Roopaei, M., y Roopaei, R. (2024, May). Gamifying ai education for young minds: The transai adventure in learning. En *2024 ieee world ai iot congress (aiiot)*.
- Saddhono, K., Suhita, R., Rakhmawati, A., Rohmadi, M., y Sukmono, I. K. (2024, November). Ai and literacy: Developing critical thinking and analytical skills in the digital era. En *2024 international conference on iot, communication and automation technology (icicat)*.
- Schunk, D. H. (2012). *Learning theories: An educational perspective* (6th ed.). Pearson.
- Siemens, G. (2005). *Connectivism: A learning theory for the digital age*. <http://www.elearnspace.org/Articles/connectivism.htm>.
- Song, P., y Wang, X. (2020). A bibliometric analysis of worldwide educational artificial intelligence research development in recent twenty years. *Asia Pacific Education Review*, 21(3), 473–486. doi: 10.1007/s12564-020-09640-2
- Sánchez-Jiménez, R., Guerrero-Castillo, P., Guerrero-Bote, V. P., Halevi, G., y De-Moya-Anegón, F. (2024). Analysis of the distribution of authorship by gender in scientific output: A global perspective. *Journal of Informetrics*, 18(3), 101556. doi: 10.1016/j.joi.2024.101556
- Tedre, M., Toivonen, T., Kahila, J., Vartiainen, H., Valtonen, T., Jormanainen, I., y Pears, A. (2021). Teaching machine learning in k–12 classroom: Pedagogical and technological trajectories for artificial intelligence education. *IEEE Access*, 9, 110558–110572. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3097962
- Tek, F. B., Benli, K. S., y Deveci, E. (2018). Implicit theories and self-efficacy in an introductory programming course. *IEEE Transactions on Education*, 61(3), 218–225. doi: 10.1109/TE.2017.2789183
- UNESCO. (2019). *Beijing consensus on artificial intelligence and education*. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000368303>. (Accessed: 2025-05-31)
- UNESCO. (2022). *K-12 ai curricula: a mapping of government-endorsed ai curricula*. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380602>.
- Vygotsky, L. S. (1978). *Mind in society: The development of higher psychological processes*. Harvard University Press.
- Williams, R. (2024). *Impact.ai: Democratizing ai through k-12 artificial intelligence education*. <https://www.media.mit.edu/publications/impact-ai-thesis/>.
- Wu, J. (2022). Quality evaluation model of artificial intelligence general education online course based on ai algorithm. En *2022 international conference on education, network and information technology (icenit)*. 2-3 Sept. 2022.
- Yepes Zuluaga, S. M., y Granada, W. F. M. (2023). Engineers' self-perceived employability by gender and age: Implications for higher education. *Cogent Education*, 10(2), 2287928.

doi: 10.1080/2331186X.2023.2287928

Zafari, M., Bazargani, J. S., Sadeghi-Niaraki, A., y Choi, S. M. (2022). Artificial intelligence applications in k-12 education: A systematic literature review. *IEEE Access*, 10, 61905–61921. doi: 10.1109/ACCESS.2022.3179356

Plataforma de Aprendizaje asistida por la Inteligencia Artificial y el DUA, para el desarrollo de competencias matemáticas, en estudiantes sordos de la ciudad de Medellín

Frank Alexander Parra Sánchez¹, Henry Omar Sarmiento Maldonado²,
Carmen Amelia Camacho Sanabria³,

Resumen

La agenda 2030 para el desarrollo sostenible, aprobada en el año 2015, presenta una hoja de ruta dirigida a los diferentes países que están suscritos en ella, donde se incluyen temas de interés prioritario para todos los territorios. En particular, la reducción de las brechas que generan desigualdad y el fortalecimiento de la inclusión de las poblaciones que, históricamente, han sido marginadas. De los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en este trabajo se destaca el número 4 (ODS4), en el que se plantea redoblar los esfuerzos para garantizar una educación inclusiva y equitativa de calidad, con el fin de promover oportunidades de aprendizaje permanente para todos. En este sentido, la presente propuesta doctoral pretende aportar al cumplimiento del ODS4, al focalizarse en el desarrollo de competencias matemáticas en la población sorda. Para lograrlo, se toman en cuenta los principios del Diseño Universal para el Aprendizaje (DUA), con mediaciones de la Inteligencia Artificial (IA). Esta integración, de acuerdo con el Consenso de Beijing, celebrado en el 2019, permite garantizar un aprendizaje flexible, permanente y personalizado. La propuesta incluye el análisis de literatura para valorar la pertinencia y la validez de la propuesta, así como los métodos, procedimientos e impactos esperados.

Palabras clave: Diseño Universal para el Aprendizaje, Inteligencia Artificial, Población sorda.

Abstract

The 2030 Agenda for Sustainable Development, adopted in 2015, provides a strategic framework for the signatory countries, addressing issues of critical importance across all regions. Among its priorities are the reduction of inequality gaps and the advancement of inclusion for historically marginalized populations. Of the 17 Sustainable Development Goals (SDGs), this research emphasizes SDG 4, which calls for intensified efforts to ensure inclusive, equitable, and high-quality education, while promoting lifelong learning opportunities for all. In alignment with this objective, the present doctoral proposal seeks to contribute to SDG 4 by focusing on the development of mathematical competencies in deaf students. To this end, the project integrates the principles of Universal Design for Learning (UDL) with the affordances of Artificial Intelligence (AI). According to the 2019 Beijing Consensus on Artificial Intelligence and Education, this integration fosters flexible, continuous, and personalized learning experiences. The proposal includes a systematic literature review to assess the relevance, feasibility, and

¹ frank_parra106242@elpoli.edu.co - Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid

² hosarmiento@elpoli.edu.co - Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid

³ carmen.camacho@caroycuervo.gov.co - Instituto Caro y Cuervo

academic grounding of the approach. Furthermore, it outlines the research methods, procedural framework, and the expected impacts of implementing an AI-assisted learning platform designed to enhance accessibility, autonomy, and equity in mathematics education for the deaf community.

1. Planteamiento del problema

El Objetivo de Desarrollo Sostenible número 4 (ODS 4) promueve una educación inclusiva, equitativa y de calidad, con oportunidades de aprendizaje permanente para todos (ONU, 2018). Sin embargo, en Colombia persisten inequidades profundas que afectan a poblaciones como la comunidad sorda, particularmente en el acceso, permanencia y desarrollo de competencias matemáticas. Según el INSOR (2022), en 2021 más de 2000 personas sordas en zonas rurales no accedían al sistema educativo, y se registraban altos índices de deserción tras la primaria. En Medellín, Orozco (2022) señala que solo entre 40 y 50 sordos han intentado ingresar a la universidad, sin éxito. Esta exclusión se ve agravada por la escasa disponibilidad de intérpretes en las instituciones públicas y la falta de formación docente en lengua de señas, lo que deja a los estudiantes sordos en una situación de aislamiento académico.

Esta realidad evidencia que la presencia física en el aula no garantiza el derecho a aprender. Como advierten Rodríguez Díaz y Ferreira (2010), muchas políticas de inclusión no se traducen en mejoras sustantivas de los aprendizajes. Esta crítica se alinea con un enfoque contemporáneo de la discapacidad, que la concibe como resultado de la interacción entre el individuo y entornos que no reconocen la diversidad (UNESCO, 2019). Desde esta perspectiva, una deficiencia sensorial solo se convierte en discapacidad cuando impide la participación plena en igualdad de condiciones.

Garantizar equidad educativa requiere entonces diseñar entornos, materiales y estrategias sensibles a las necesidades específicas de los estudiantes. En este sentido, Alba Pastor, Sánchez Serrano, y Zubillaga del Río (2013) afirman que educar con equidad significa ofrecer a cada estudiante los apoyos que requiere para aprender. Bajo esta premisa, el uso de tecnologías como la Inteligencia Artificial (IA) representa una oportunidad para reducir barreras, personalizar el aprendizaje y fomentar la autonomía en poblaciones históricamente excluidas (Sánchez, 2024). Adicionalmente la UNESCO (2019) también reconoce el potencial de la IA para apoyar el aprendizaje adaptado, especialmente en contextos de diversidad.

No obstante, la implementación de estas tecnologías enfrenta retos significativos. Como advierte Sánchez (2024), persisten obstáculos técnicos, deficiencias de infraestructura y baja preparación docente. Además, aunque existen plataformas orientadas a población sorda (como aiD Project, Dillo.ai, SignAI, Visualfy o PidGin), muchas presentan limitaciones en cuanto a interactividad, autonomía y acceso libre, y algunas dependen de la mediación constante de oyentes, lo que contradice los principios de accesibilidad plena.

Ante esta situación, esta investigación identifica, como problema central, la falta de recursos tecnológicos y humanos que permitan a los estudiantes sordos de Medellín acceder, de forma equitativa y autónoma, al aprendizaje matemático. En respuesta, se propone el diseño y validación de una Plataforma de Aprendizaje (PA), asistida por IA, basada en el Diseño Universal para el Aprendizaje (DUA) (Alba Pastor et al., 2013), la teoría de los Registros de Representación Semiótica (RRS) (Duval, 2006, 1995, 1993) y la concepción de la visualidad y la lengua de señas como dimensiones constitutivas de la subjetividad sorda (Peluso y Balieiro Lodi, 2015). Esta plataforma integrará tecnologías como el reconocimiento automático de señas, generación de avatares, sistemas de recomendación y retroalimentación personalizada.

La propuesta se desarrollará mediante una metodología mixta con enfoque descriptivo-explicativo, bajo el modelo de Investigación Basada en Diseño (DBR, por sus siglas en inglés), estructurada en cuatro fases: revisión sistemática, análisis teórico, diseño conceptual de módulos funcionales y validación con estudiantes sordos y juicio experto. Bajo esta línea de pensamiento, en el marco de la presente

propuesta doctoral, se busca dar respuesta a la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo desarrollar una Plataforma de Aprendizaje Asistida por Inteligencia Artificial, basada en los principios del DUA para el desarrollo de competencias matemáticas en estudiantes sordos de la ciudad de Medellín?

2. Objetivos de investigación

2.1. Objetivo general:

Desarrollar una Plataforma de Aprendizaje Asistida por Inteligencia Artificial y los principios del DUA para el desarrollo de competencias matemáticas en estudiantes sordos de la ciudad de Medellín

2.2. Objetivos específicos:

- Caracterizar las Plataformas de Aprendizaje asistidas por IA y dirigidas a la población sorda, mediante una revisión sistemática de literatura para identificar niveles de accesibilidad, interactividad, beneficios y limitaciones en el desarrollo de competencias matemáticas en esta población
- Analizar las teorías y perspectivas de aprendizaje de las matemáticas en la población sorda, mediante una revisión sistemática de literatura, para la identificación de enfoques educativos efectivos que lleven al diseño de recursos y estrategias inclusivas que respondan a las necesidades específicas de esta población.
- Diseñar una plataforma de aprendizaje de las matemáticas para la población sorda, mediante los principios del DUA y la integración de técnicas y herramientas de IA, para asegurar accesibilidad, interactividad y adaptabilidad con el usuario.
- Validar la eficacia y usabilidad de la plataforma mediante pruebas piloto con estudiantes sordos y retroalimentación experta, analizando su impacto en el desarrollo de competencias matemáticas.

3. Justificación

Con el fin de sustentar la pertinencia de la presente propuesta, a continuación, se presenta una síntesis de los resultados de la revisión sistemática de literatura. La metodología de revisión se siguió con base en los procedimientos propuestos por [Kitchenham y Charters \(2007\)](#), donde se proporciona una guía estructurada y rigurosa para identificar, evaluar y sintetizar la evidencia existente sobre un tema específico. Adicionalmente, el método desarrollado por Kitchenham favorece un proceso de revisión sistemática más claro, reproducible y con menor riesgo de sesgos en cada una de sus etapas. Asimismo, se presenta como una herramienta metodológicamente sólida para elaborar estados del arte en investigaciones de naturaleza interdisciplinar, como la que aquí se desarrolla, en la que se articulan necesidades educativas de estudiantes sordos con propuestas tecnológicas desde el campo de la ingeniería. Los resultados de esta revisión sistemática se organizan en torno a tres ejes principales: las características funcionales y tecnológicas de las plataformas de aprendizaje (PA) asistidas por inteligencia artificial para población sorda; las estrategias de accesibilidad e interactividad implementadas; y los beneficios, limitaciones y potencialidades reportadas en relación con el desarrollo de competencias matemáticas. Para organizar el proceso de revisión y facilitar el análisis respectivo, se establecieron tres categorías de análisis: características y funcionalidades de las PA, estrategias de accesibilidad e interactividad y limitaciones y potencialidades.

En lo que respecta a la primera categoría, las plataformas revisadas presentan una notable diversidad en cuanto al software y hardware utilizado, así como en las técnicas e infraestructuras de inteligencia artificial integradas. La mayoría de los desarrollos emplean algoritmos de visión por computador

y redes neuronales convolucionales (CNN), especialmente para el reconocimiento de señas manuales estáticas. Sin embargo, son escasas las propuestas que incorporan arquitecturas híbridas que combinen reconocimiento de gestos dinámicos, análisis semántico y generación de respuestas. En términos de alcance funcional, muchas plataformas se limitan a funciones de traducción o visualización, mientras que pocas se constituyen como entornos de aprendizaje completos, con objetivos formativos claramente definidos en el campo de la educación matemática.

La segunda categoría, centrada en las estrategias de accesibilidad e interactividad, pone en evidencia avances importantes, pero también vacíos críticos. A pesar de que la mayoría de las plataformas ofrece alguna forma de interfaz visual, solo una minoría alcanza niveles altos de interacción bidireccional (IB), autonomía (AU) y adaptabilidad didáctica (AD). En efecto, aunque el reconocimiento de señas ha alcanzado niveles aceptables de precisión técnica, pocas herramientas son capaces de interpretar frases completas en lengua de señas o sostener una conversación contextualizada con el usuario, lo que limita severamente su valor pedagógico. En términos de autonomía, los resultados muestran que solo en los casos en que se han incorporado avatares comunicativos, navegación accesible sin mediadores y acompañamiento visual integral, puede hablarse de una experiencia autónoma real. La adaptabilidad didáctica (entendida como la capacidad del sistema para ajustar contenidos, niveles de dificultad y modalidades representacionales al ritmo y estilo del usuario) es el componente más rezagado. La mayoría de plataformas presenta una progresión lineal y sin rutas de aprendizaje diferenciadas, lo cual no aporta tanto los principios del DUA, como los fundamentos teóricos de la representación semiótica en educación matemática (Duval, 1993, 1995, 2006). La tabla No 1 relaciona el número de trabajos, dependiendo qué tipo de señas reconocen (estáticas y dinámicas), o si no especifican.

Tipo de seña reconocida	N° de trabajos	Porcentaje aproximado
Solo señas estáticas	31	49.2
Señales dinámicas	25	39.7
Ninguna o no especificados	7	11.1

Tabla 1: Reconocimiento de señas estáticas Vs señas dinámicas

Para hacer un análisis más específico, la tabla No 2 relaciona los cinco trabajos que reconocen la mayor cantidad de señas dinámicas, detallando el número de gestos identificados, la técnica empleada y el tipo de entrada utilizada

Ator(es) y año	Número de señas dinámicas	Tipo de entrada principal
Hu et al. (2025)	7886 queries	Procesamiento de video
Calado et al. (2022)	10 palabras dinámicas (5000 instancias)	Visión por computador
Yang et al. (2024)	8 frases (320 muestras)	Sensores físicos
Strobel et al. (2023)	Más de 200 palabras	Procesamiento del video
Gao et al. (2023)	Hasta 178 palabras	Procesamiento de video

Tabla 2: Señas dinámicas VS tipo de entrada principal

De la tabla anterior, se puede ver que solo dos trabajos (Calado et al., 2022; Yang et al., 2024) detectan señas dinámicas en interacción con el usuario; sin embargo, únicamente detectan 10 y 8 señas dinámicas, respectivamente.

Finalmente, en la categoría de limitaciones y potencialidades, se destaca que muchos de los artículos revisados reportan resultados positivos en términos de motivación, comprensión de conceptos básicos y superación de barreras de comunicación. No obstante, se reconocen también importantes limitaciones: baja precisión en el reconocimiento de gestos dinámicos, dificultad para representar contenidos mate-

máticos complejos en lengua de señas, y escasa validación empírica con población sorda real. De los más de 70 artículos revisados, solo una fracción logra niveles plenos en las tres categorías de evaluación final (IB, AU y AD). Entre estos se encuentran desarrollos como los de [Coy, Mohammed, y Skerrit \(2025\)](#); [Kumar et al. \(2024\)](#); [Kurtoglu et al. \(2024\)](#); [Mouti y Rihawi \(2023\)](#); [Strobel et al. \(2023\)](#); [Ulrich et al. \(2024\)](#); [Umut y Kumdereli \(2024\)](#), que se caracterizan por articular adecuadamente los componentes técnicos y pedagógicos desde una lógica de diseño centrado en el usuario sordo. Aun así, incluso estos presentan desafíos importantes en términos de validación contextualizada y adecuación curricular a sistemas educativos específicos, como el colombiano.

En conjunto, los hallazgos de esta revisión sistemática evidencian que la inteligencia artificial ofrece un campo fértil para el desarrollo de herramientas educativas inclusivas, pero también que la mayoría de los desarrollos actuales se encuentran aún en etapas exploratorias o con un foco predominantemente tecnológico. Para avanzar hacia una inclusión efectiva, se requiere una integración más profunda entre ingeniería, pedagogía y participación activa de la comunidad sorda en el diseño de las soluciones. Estos hallazgos justifican el desarrollo de propuestas como estas, en el que se pretende llenar los vacíos existentes en cuanto a la atención de la población sorda para el acceso al aprendizaje y el desarrollo de habilidades matemáticas, mediante software especializado.

4. Marco teórico

El presente marco teórico integra enfoques pedagógicos y cognitivos que pueden ser relevantes para el diseño de plataformas inclusivas de aprendizaje para estudiantes sordos (aunque se puede extender para cualquier estudiante). Se aborda el DUA, la teoría de los Registros de Representación Semiótica (RRS) y la función de los gestos como signos pivote. Estos marcos permiten fundamentar estrategias que articulen accesibilidad, aprendizaje de las matemáticas y tecnologías basadas en IA. El análisis que se presenta a continuación se orienta hacia la comprensión de cómo desarrollar entornos multimodales, flexibles, adaptativos y culturalmente pertinentes.

4.1. Diseño Universal para el Aprendizaje

El DUA, desarrollado por el Centro para la Tecnología Especial Aplicada (CAST), es un enfoque pedagógico que busca ofrecer igualdad de oportunidades para todos los estudiantes, no solo mediante el acceso físico al aula, sino también mediante la diversificación de los procesos cognitivos y afectivos implicados en el aprendizaje. Con base en investigaciones neurocientíficas, el CAST propone tres principios fundamentales que guían la construcción de currículos flexibles ([Peluso y Balieiro Lodi, 2015](#)):

Múltiples formas de representación: reconoce que los estudiantes difieren en cómo perciben y comprenden la información, por lo que deben ofrecerse diversas formas de presentar el contenido.

Múltiples formas de acción y expresión: se refiere a la necesidad de ofrecer diferentes vías para que los estudiantes demuestren lo que saben.

Múltiples formas de implicación: enfatiza el componente motivacional, brindando opciones que involucren, emocional y cognitivamente, a los estudiantes.

Estos principios son altamente pertinentes para el diseño de plataformas de aprendizaje accesibles a estudiantes sordos, ya que permiten personalizar los contenidos, facilitar la comprensión mediante representaciones visuales, y adaptar las formas de participación, en coherencia con las necesidades comunicativas de esta población.

4.2. Teoría de los Registros de Representación Semiótica

La Teoría de los RRS, formulada por [Duval \(1993, 1995, 2006\)](#), sostiene que la comprensión matemática depende de los sistemas semióticos mediante los cuales los conceptos se representan: algebraico,

gráfico, tabular, verbal, entre otros. En este marco, el aprendizaje implica tratamiento dentro del mismo registro y conversión entre registros distintos, siendo esta última la más compleja y decisiva para la comprensión profunda. Para estudiantes sordos, cuya comunicación es predominantemente visual-gestual, esta teoría enfatiza la necesidad de priorizar registros accesibles a la lengua de señas, como animaciones, gráficos o representaciones espaciales. Las plataformas educativas deben facilitar estas conversiones mediante tecnologías que automaticen la traducción de símbolos a visualizaciones comprensibles.

Complementariamente, la Teoría de la Mediación Semiótica (Bartolini Bussi y Mariotti, 2008) resaltan el papel de los gestos como signos pivote que enlazan experiencias concretas con significados matemáticos abstractos. Maffia y Sabena (2020) describen estos signos dentro de cadenas semióticas multimodales, donde gestos icónicos y deícticos sincronizados con el discurso permiten estructurar el conocimiento. En contextos inclusivos, los avatares y animaciones deben ser diseñados como agentes semióticos activos que operen como puentes visuales entre registros, fortaleciendo la comprensión matemática en estudiantes sordos.

4.3. Funcionalidades de IA en el diseño de plataformas de aprendizaje para población sorda

La integración de la inteligencia artificial (IA) en plataformas educativas dirigidas a estudiantes sordos permite operacionalizar los principios del DUA y la teoría de los RRS mediante herramientas que atienden necesidades comunicativas, cognitivas y culturales. Algunas funcionalidades clave incluyen:

Adaptación dinámica de contenidos: la IA puede modificar el formato de los materiales según el perfil de cada usuario, favoreciendo registros visuales como animaciones, gráficos o representaciones espaciales.

Interacción mediada por avatares: los avatares animados pueden comunicarse en lengua de señas, actuando como mediadores del contenido y facilitando la navegación autónoma.

Análisis del desempeño: mediante técnicas de machine learning, la plataforma puede identificar patrones de error o progreso en el aprendizaje, y ofrecer retroalimentación personalizada.

Sistemas de recomendación: algoritmos de filtrado colaborativo y contenido basado permiten sugerir recursos y rutas de aprendizaje ajustadas al historial del usuario.

Cada una de estas funcionalidades puede concretarse a través de técnicas específicas de IA, tales como: *Sistemas de Recomendación Adaptativos:* utilizan algoritmos como SVD o TensorFlow Recommenders para sugerir representaciones o actividades más eficaces para cada estudiante, considerando su historial de interacciones y preferencias.

Aprendizaje con Machine Learning (ML): permite modelar el progreso del estudiante y anticipar necesidades de apoyo. Algoritmos como K-means, DBSCAN o Bayesian Knowledge Tracing son útiles para identificar estilos de aprendizaje y dificultades específicas.

Procesamiento de Lenguaje Natural (PNL) adaptado a lengua de señas: aunque las lenguas de señas no son escritas, el PNL puede adaptarse para generar señas a partir de texto, reconocer intenciones del usuario y ofrecer equivalencias visuales con modelos como Transformers, entrenados en corpus específicos.

Reconocimiento Automático de Señas y Avatares: el uso de visión por computador y redes neuronales convolucionales (como MediaPipe, OpenPose o YOLO) permite interpretar señas captadas por cámara y generar respuestas visuales inmediatas en lengua de señas mediante avatares.

Tutores Inteligentes y Motores de Retroalimentación Adaptativa: estos sistemas combinan minería de datos, sistemas expertos y modelos bayesianos para ofrecer pistas, cambiar representaciones o adaptar explicaciones a las necesidades del estudiante, en especial cuando hay bloqueos cognitivos.

5. Métodos y procedimientos

Este estudio adopta un enfoque de investigación mixta, integrando métodos cuantitativos y cualitativos para ofrecer una comprensión integral del diseño de plataformas de aprendizaje dirigidas a la población sorda. El componente cuantitativo se enfoca en evaluar métricas de accesibilidad, interactividad y eficiencia del reconocimiento de señas, mientras que el cualitativo permite identificar necesidades específicas, analizar experiencias de uso y recoger retroalimentación experta. Esta combinación metodológica posibilita una aproximación profunda desde modelos educativos y principios teóricos orientados a la inclusión.

El alcance es descriptivo-explicativo, sustentado en el enfoque de Investigación Basada en Diseño (Design-Based Research, DBR). Es descriptivo al caracterizar plataformas existentes y teorías sobre el aprendizaje de las matemáticas en personas sordas; y explicativo al analizar cómo el DUA y modelos pedagógicos fundamentan la selección de herramientas de IA. El enfoque DBR guía el diseño, implementación y validación de una solución educativa: una PA accesible, interactiva y autónoma (Antón-Sancho, Fernández-Arias, y Vergara-Rodríguez, 2023; Brown, 1992; Gibson, 2024; Togni, 2025; Yang et al., 2024).

La selección de participantes en la fase de validación será intencionada y no probabilística, dado que se requiere una muestra específica: estudiantes usuarios de lengua de señas, pertenecientes a instituciones educativas y con disposición para participar. Como señala Hernández Sampieri et al. (2014), este tipo de muestreo es pertinente cuando se buscan casos con características particulares, especialmente en poblaciones con baja representación como la comunidad sorda.

Finalmente, el marco DBR permite una interacción continua entre teoría y práctica (Crepon, 2014), articulando el rigor investigativo con el diseño tecnológico. Así, los principios del DUA y las teorías cognitivas guían el uso de herramientas basadas en IA para desarrollar una plataforma educativa adaptada a las necesidades de los estudiantes sordos.

En concordancia con la metodología propuesta, en la tabla No 3 se describen los métodos y procedimientos, los cuales se organizan con base en los objetivos específicos. Los métodos son las estrategias generales de investigación y responden a la pregunta “¿Cómo se va a abordar el problema?”. Por su parte, los procedimientos son los pasos concretos o secuencias operativas que permiten la implementación del método.

Tabla 3: Fases, métodos y procedimientos

Fase del proyecto	Método	Procedimiento
Revisión del estado del arte sobre plataformas IA para la población sorda	RSL (método Kit-chenham)	Definición de preguntas de investigación, elaboración del protocolo de revisión, fuentes y términos de búsqueda, criterios de inclusión y exclusión.
Revisión del estado del arte sobre enseñanza de matemáticas en población sorda	Análisis comparativo y revisión teórica	Selección de fuentes teóricas clave, análisis conceptual comparado de enfoques, identificación de principios aplicables.

Fase del proyecto	Método	Procedimiento
Diseño de la plataforma	Diseño conceptual (método de investigación en ingeniería)	Recolección de requerimientos técnicos y pedagógicos, diseño de la arquitectura del sistema y módulos funcionales, bocetos de interfaz accesible (DUA), implementación del prototipo web con reconocimiento de señas.
Validación con estudiantes sordos	Estudio piloto (cuasi-experimental)	Articulación con INSOR, aplicación de pre-test, interacción autónoma con la plataforma, post-test y recolección de retroalimentación.
Evaluación por expertos	Validación por juicio experto	Selección de especialistas, entrevistas semiestructuradas, recolección y análisis de recomendaciones.

6. Impactos esperados

El impacto de esta propuesta doctoral se proyecta en los ámbitos educativo, tecnológico y social. En lo educativo, se espera mejorar el acceso al aprendizaje matemático para estudiantes sordos mediante una plataforma que responda a sus necesidades comunicativas y fomente la interacción autónoma, reduciendo la dependencia del intérprete. Pedagógicamente, la incorporación del DUA ampliará las formas de representación y participación, promoviendo prácticas inclusivas. En lo tecnológico, la propuesta representa una innovación al integrar reconocimiento de lengua de señas, visión por computador y modelado lingüístico, generando una comunicación accesible y bidireccional. Socialmente, contribuirá al cierre de brechas de exclusión digital y educativa, y podrá orientar políticas públicas hacia entornos más equitativos y sostenibles. Al reconocer la lengua de señas como medio legítimo de enseñanza, se reafirma el valor de la diversidad lingüística en el diseño de soluciones tecnológicas inclusivas, con potencial de ser transferidas y escaladas.

7. Componente de innovación y aporte a la ciencia

Esta propuesta doctoral aporta significativamente a la integración entre ingeniería y educación, con un enfoque interdisciplinar basado en la innovación tecnológica y el avance del conocimiento científico. Propone una plataforma de aprendizaje que combina técnicas avanzadas de inteligencia artificial—como visión por computador, aprendizaje profundo y procesamiento del lenguaje natural—con los principios del DUA, creando una solución educativa inédita en Colombia. Esta plataforma reconoce lengua de señas y responde mediante avatares gestuales, promoviendo una experiencia autónoma y bidireccional para estudiantes sordos, con una arquitectura modular, escalable y personalizable. Científicamente, contribuye al fortalecimiento de DBR en ingeniería educativa, mediante una metodología rigurosa que integra diseño, desarrollo iterativo y validación empírica. Asimismo, plantea un cambio de enfoque en el uso de IA hacia sistemas centrados en usuarios con barreras comunicativas, abriendo nuevas líneas de investigación y aplicaciones transferibles a otros contextos educativos inclusivos.

Referencias

- Alba Pastor, C., Sánchez Serrano, J. M., y Zubillaga del Río, A. (2013). *Pautas para la introducción del diseño universal para el aprendizaje (dua) en el currículo. proyecto dualitic*. Descargado de <https://www.cast.org/publications/universal-design-learning-guidelines> (Accedido en 2025)
- Antón-Sancho, A., Fernández-Arias, P., y Vergara-Rodríguez, D. (2023). Impact of the covid-19 pandemic on the use of ict tools in science and technology education. *Journal of Technology and Science Education*, 13(1), 130–158. doi: 10.3926/jotse.1860
- Bartolini Bussi, M. G., y Mariotti, M. A. (2008). Semiotic mediation in the mathematics classroom: artifacts and signs after a vygotskian perspective. En L. English, M. G. Bartolini Bussi, G. Jones, R. Lesh, y D. Tirosh (Eds.), *Handbook of international research in mathematics education* (pp. 746–783). Lawrence Erlbaum Associates.
- Brown, A. L. (1992). Design experiments: Theoretical and methodological challenges in creating complex interventions in classroom settings. *Educational Researcher*, 21(1), 9–16. doi: 10.3102/0013189X021001009
- Calado, A., Roselli, P., Errico, V., Magrofuoco, N., Vanderdonckt, J., y Saggio, G. (2022). A geometric model-based approach to hand gesture recognition. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 52(10), 6151–6161. doi: 10.1109/TSMC.2021.3138589
- Coy, A., Mohammed, P. S., y Skerret, P. (2025). Inclusive deaf education enabled by artificial intelligence: The path to a solution. *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, 35(1), 96–134. doi: 10.1007/s40593-024-00419-9
- Crepon, R. (2014). Application of design research methodology to a context-sensitive study in engineering education. En *Proceedings of the ieee global engineering education conference (educon)*. Madrid, Spain.
- Duval, R. (1993). Registres de représentation sémiotique et fonctionnement cognitif de la pensée. *Annales de Didactique et de Sciences Cognitives*, 5, 37–65.
- Duval, R. (1995). *Sémiosis et pensée humaine: registres sémiotiques et apprentissages intellectuels*. Peter Lang.
- Duval, R. (2006). A cognitive analysis of problems of comprehension in a learning of mathematics. *Educational Studies in Mathematics*, 61(1–2), 103–131. doi: 10.1007/s10649-006-0400-z
- Gao, L., Hu, L., Lyu, F., Zhu, L., Wan, L., Pun, C. M., y Feng, W. (2023). Difference-guided multi-scale spatial-temporal representation for sign language recognition. *Visual Computer*, 39(8), 3417–3428. doi: 10.1007/s00371-023-02979-8
- Gibson, R. (2024). *The impact of ai in advancing accessibility for learners with disabilities*. EDUCAUSE Review.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., y Baptista Lucio, M. d. P. (2014). *Metodología de la investigación* (6.ª ed.). McGraw-Hill Interamericana.
- Hu, K., He, F., Schembri, A., y Wang, Z. (2025). Graph traverse reference network for sign language corpus retrieval in the wild. *Neurocomputing*, 637, 130077. doi: 10.1016/j.neucom.2025.130077

- INSOR. (2022). *Lineamientos para la atención educativa de niños, niñas, adolescentes y jóvenes sordos en territorios rurales y rurales dispersos*. Descargado de <https://educativo.insor.gov.co/wp-content/uploads/2023/05/Lineamientos-ruralidad-educacion-para-sordos.pdf>
- Kitchenham, B., y Charters, S. (2007). *Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering (ebse-2007-01)*. Descargado de <https://www.cs.auckland.ac.nz/~norsaremah/2007%20Guidelines%20for%20performing%20SLR%20in%20SE%20v2.3.pdf>
- Kumar, S., D, B., K, T., T, M., S, V., y N, B. (2024). A novel approach for sign language video generation using deep networks. En *2024 international conference on data science and network security (icdsns)*. 26–27 July 2024.
- Kurtoğlu, E., DeHaan, K., Pezzarossi, C. K., Griffin, D. J., Crawford, C., y Gurbuz, S. Z. (2024). Interactive learning of natural sign language with radar. *IET Radar, Sonar and Navigation*, 18(8), 1203–1216. doi: 10.1049/rsn2.12565
- Maffia, A., y Sabena, C. (2020). On the mathematics teacher's use of gesture as pivot signs in semiotic chains. *For the Learning of Mathematics*, 40(1), 15–21.
- Mouti, S., y Rihawi, S. (2023). Special needs classroom assessment using a sign language communicator (casc) based on artificial intelligence (ai) techniques. *International Journal of e-Collaboration*, 19(1). doi: 10.4018/IJeC.313960
- ONU. (2018). *La agenda 2030 y los objetivos de desarrollo sostenible: una oportunidad para américa latina y el caribe (lc/g.2681-p/rev.3)*. Descargado de <https://www.cepal.org/es/publicaciones>
- Orozco, L. F. (2022). *Las conquistas de la comunidad sorda en medellín*. El Espectador. Descargado de <https://www.elespectador.com/colombia/mas-regiones/las-conquistas-de-la-comunidad-sorda-en-medellin/> (11 febrero 2022)
- Peluso, L., y Balieiro Lodi, A. C. (2015). La experiencia visual de los sordos: consideraciones políticas, lingüísticas y epistemológicas. *Pro-Posições*, 26(3), 59–81. doi: 10.1590/0103-7307201507803
- Rodríguez Díaz, S., y Ferreira, M. A. V. (2010). Desde la dis-capacidad hacia la diversidad funcional. un ejercicio de dis-normalización. *Revista Internacional De Sociología*, 68(2), 289–309. doi: 10.3989/ris.2008.05.22
- Strobel, G., Banh, L., Schoormann, T., y Möller, F. (2023). Artificial intelligence for sign language translation – a design science research study. *Communications of the Association for Information Systems*, 53, 42–64. doi: 10.17705/1CAIS.05303
- Sánchez, K. (2024). *Desarrollo de recursos multimedia potenciadas por inteligencia artificial para promover la inclusión y nivelación educativa en estudiantes de primaria en la unidad educativa maría luisa luque de sotomayor*. Trabajo de grado, Universidad Estatal Península de Santa Elena. Descargado de <https://repositorio.upse.edu.ec/handle/46000/12013>
- Togni, J. (2025). *Development of an inclusive educational platform using open technologies and machine learning: A case study on accessibility enhancement*. Descargado de <https://arxiv.org/abs/2503.15501>
- Ulrich, L., Carmassi, G., Garelli, P., Lo Presti, G., Ramondetti, G., Marullo, G., y Vezzetti, E. (2024). Signify: Leveraging machine learning and gesture recognition for sign language

Propuesta para el diseño de un modelo de gestión curricular que instancie técnicas y principios ágiles.

Aixa Eileen Villamizar Jaimes¹, Adriana Xiomara Reyes Gamboa², Dario
Enrique Soto Durán³,

Resumen

Este artículo presenta la propuesta de una tesis doctoral centrada en la gestión curricular en la educación superior, destacando su importancia como proceso estratégico, se plantea la necesidad de incorporar estrategias que permitan la adaptación eficaz a los cambios tecnológicos, sociales y laborales actuales. La globalización y las transformaciones del mercado laboral exigen reformas curriculares permanentes y pertinentes. La gestión curricular debe ser un proceso continuo, participativo y flexible, capaz de responder de manera efectiva a las transformaciones socioculturales y del mercado laboral. Este proceso requiere liderazgo, infraestructura tecnológica y cultura organizacional orientada a la innovación.

Los modelos tradicionales de gestión curricular se caracterizan por su rigidez y jerarquía, limitan la capacidad de respuesta a las necesidades cambiantes del entorno, por lo cual, se propone su transformación mediante la adopción de enfoques ágiles como estrategia de innovación, con el objetivo de promover la flexibilidad, participación activa y evaluación continua. La implementación de una gestión curricular ágil requiere cambios en la cultura institucional, liderazgo y uso de herramientas tecnológicas.

La metodología de investigación propuesta es de tipo mixto, combinando métodos cuantitativos y cualitativos en fases secuenciales, estas fases permitirán recopilar, analizar y diseñar un modelo de gestión curricular que incorpore prácticas ágiles. El proceso incluirá etapas de diagnóstico, caracterización, diseño y validación, con el propósito de desarrollar un modelo adaptable a distintas instituciones de educación superior.

Abstract

This article presents the proposal of a doctoral thesis focused on curriculum management in higher education, emphasizing its importance as a strategic process. It highlights the need to incorporate strategies that enable effective adaptation to current technological, social, and labor changes. Globalization and labor market transformations demand ongoing and relevant curricular reforms.

Curriculum management must be a continuous, participatory, and flexible process, capable of effectively responding to sociocultural and labor market transformations. This process requires leadership, technological infrastructure, and an organizational culture oriented toward innovation. Traditional models of curriculum management are characterized by rigidity and hierarchical structures, which limit their responsiveness to the changing needs of the environment. Therefore, a transformation is proposed

¹ aixa.villamizar@tdea.edu.co - Tecnológico de Antioquia, Institución Universitaria

² areyes@elpoli.edu.co - Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid

³ dsoto@tdea.edu.co - Tecnológico de Antioquia - Institución Universitaria

through the adoption of agile approaches as an innovation strategy, with the aim of promoting flexibility, active participation, and continuous evaluation. Implementing agile curriculum management requires changes in institutional culture, leadership, and the use of technological tools.

The proposed research methodology is mixed, combining quantitative and qualitative methods in sequential phases. These phases will allow for the collection, analysis, and design of a curriculum management model that incorporates agile practices. The process will include stages of diagnosis, characterization, design, and validation, with the goal of developing a model adaptable to different higher education institutions.

Palabras clave: *Gestión curricular, modelo de gestión, prácticas ágiles.*

1. Introducción

La gestión curricular representa uno de los procesos más estratégicos y representativos de las instituciones de educación superior, pues determina la manera en cómo, cuándo y porque aprenden los estudiantes.

Actualmente, las instituciones de educación superior se enfrentan a constantes retos encaminados a responder con agilidad a los cambios que el entorno impone, es así como cobra importancia los avances tecnológicos, las transformaciones sociales y demandas del mercado laboral. En este contexto, la gestión curricular adquiere un rol fundamental como herramienta de planeación académica, aseguramiento de la calidad y construcción de una oferta educativa pertinente y flexible (Nisperuza, Díaz, y Merlano, 2022; H. C. Sánchez et al., 2021).

De acuerdo con (J. C. Sánchez, 2017) la educación moderna aún refleja modelos tradicionales transmisivos, en los que el docente transmite conocimientos de manera directa y estructurada a los estudiantes, no obstante, frente al panorama actual en el que se caracteriza por cambios constantes, es importante que las instituciones de educación superior adopten un enfoque flexible, innovador y colaborativo.

Las dinámicas actuales han dejado al descubierto diferentes deficiencias de los modelos tradicionales de gestión curricular, los cuales están diseñados para ser manejados de una manera jerárquica e incluso rígida, lo cual impiden una adecuada adaptación a las necesidades cambiantes de los estudiantes y del entorno. La gestión curricular en concordancia con la evolución del contexto educativo requiere flexibilidad y una mayor conexión con la práctica, las demandas del mundo laboral y las necesidades sociales. Esto implica repensar el diseño, desarrollo y evaluación del currículo para fomentar la innovación y la relevancia.

En este contexto, el presente artículo presenta una propuesta de tesis doctoral orientada al diseño de un modelo de gestión curricular que incorpore los factores previamente identificados. Esta propuesta se fundamenta en el agilismo como una estrategia de innovación, con el objetivo de promover una gestión curricular flexible, continua y adaptativa, capaz de responder a los constantes cambios que enfrentan las instituciones de educación superior en el actual entorno globalizado. Para ello, se plantea el uso de herramientas y/o técnicas ágiles que faciliten el seguimiento y la medición efectiva del proceso de gestión curricular.

A continuación, se presentan los principales hallazgos y antecedentes teóricos que sustentan esta investigación:

■ Currículo y Gestión Curricular

El currículo en la educación superior se conoce como un conjunto dinámico de experiencias de aprendizaje planificadas, que integran conocimientos, habilidades y actitudes necesarias para la formación integral del estudiante. Según (Dazeley et al., 2025) el currículo debe ser entendido como una construcción cultural y social que refleja las necesidades y valores de la sociedad, alineando la visión institucional con la demanda de la industria.

En este contexto, la gestión curricular se entiende como un proceso sistémico que articula la planificación, implementación, evaluación y mejora continua del currículo, con el objetivo de garantizar la calidad de los programas académicos y su pertinencia social (Ariza, 2014).

La globalización, la internacionalización, y las tendencias laborales demandan reformas curriculares constantes para mejorar la pertinencia y calidad de la educación superior (J. C. Sánchez, 2017). La gestión curricular eficiente debe considerar tanto los resultados de aprendizaje esperados como las transformaciones del entorno sociocultural y laboral, permitiendo ajustes constantes que mantengan la relevancia de la formación ofrecida.

De acuerdo con (Gómez, 2023) la gestión curricular en proceso fundamental para el desarrollo de los sistemas educativos actuales, debe ser flexible y adaptable, lo que implica una revisión y actualización continua que responda a las necesidades cambiantes de la sociedad y el entorno laboral, y a su vez involucrar la participación activa de todos los actores del proceso como lo son los docentes, estudiantes, administrativos, la familia y la comunidad en general.

■ Metodologías ágiles

Las metodologías ágiles surgieron como una respuesta a las limitaciones de los enfoques tradicionales en la gestión de proyectos, especialmente en el desarrollo de software. La agilidad se centra en la flexibilidad, la mejora continua y la entrega incremental de productos o servicios, permitiendo a las organizaciones adaptarse rápidamente a los cambios del entorno (Flores-Cerna et al., 2022)

Su origen se remonta al año 2001 con la publicación de El Manifiesto Ágil (Kent et al., 2001), el cual establece cuatro valores fundamentales y doce principios que promueven la colaboración, la adaptabilidad y la entrega continua de valor al cliente, en el cual se destaca la colaboración entre individuos sobre procesos y herramientas, software funcionando sobre documentación exhaustiva, colaboración con el cliente sobre negociación contractual y respuesta al cambio sobre seguir un plan.

■ Antecedentes de aplicación de metodologías ágiles en el currículo y experiencias.

A través de una revisión documental se identificaron estrategias implementadas por algunas instituciones de educación superior para incorporar metodologías ágiles en sus procesos curriculares, entre ellos se destacan las siguientes:

Hochschule Hannover (Alemania): Adaptó la metodología eduScrum en programas de Maestría, integrando proyectos reales de la industria, lo que mejoró la motivación estudiantil y la aplicabilidad del aprendizaje (Neumann y Baumann, 2021).

Universidad de Alicante (España): Desarrolló una estrategia docente para la enseñanza de metodologías ágiles en asignaturas de Ingeniería Informática, integrando prácticas como

Scrum y Kanban en proyectos de desarrollo de software ([Letelier Torres y Penadés Gramaje, 2013](#))).

Universidad San Pablo-CEU (España): Implementó metodologías ágiles en el aula en forma práctica para el Aprendizaje basado en Proyectos (APB), formando equipos ágiles para el desarrollo de talleres, utilizando Scrum y Kanban([Martín Gómez, 2020](#)).

2. Métodos y materiales

Para este proyecto, el enfoque de investigación será mixto, combinando métodos cuantitativos y cualitativos. El objetivo es aprovechar las fortalezas de ambos enfoques, permitiendo la combinación de datos numéricos identificados con descripciones detalladas de los componentes de la gestión curricular. Los dos enfoques se utilizarán de manera simultánea para satisfacer las necesidades del proyecto.

Para esta investigación, la población objeto de estudio serán instituciones de educación superior en Colombia, siendo clave para la elección aquellas instituciones que ofrezcan programas de educación superior de carácter técnico, tecnólogo, profesional y posgrado. Se espera contar dentro de la muestra, instituciones de los municipios de Medellín, Cúcuta, Ocaña y Popayán.

El diseño de la investigación será No Experimental de tipo transversal, según ([Roberto Hernández Sampieri, Carlos Fernández Collado, y Pilar Baptista Lucio, 2014](#)), este tipo de diseño permite recopilar datos en un único momento con el fin de analizar y describir las variables en un momento dado y se aplicarán instrumentos para la recolección y análisis de la información.

La metodología del proyecto comprende cinco fases que determinan la consecución de los objetivos planteados, estas fases se trabajaran de manera secuencial siguiendo un orden ascendente.

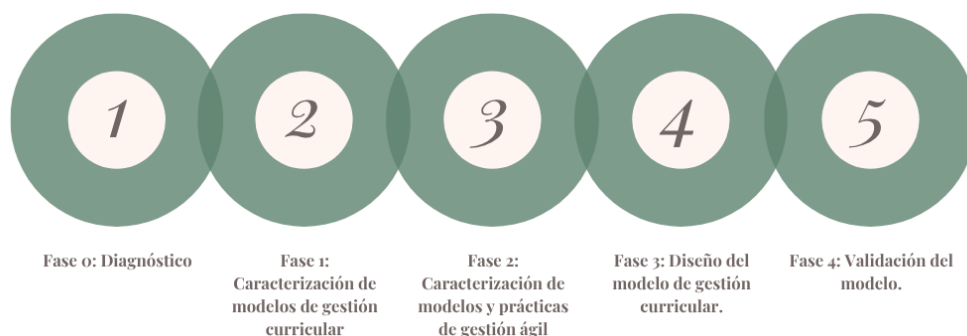


Figura 1: Metodología del proyecto.

- **Fase 0: Diagnóstico.** En esta fase se realiza una caracterización del proceso de gestión curricular en el contexto universitario, mediante la aplicación de instrumentos de carácter cualitativos (Análisis documental, análisis de contenido y observación) y cuantitativos

(cuestionarios estructurados, encuestas), con el fin de conocer la manera en cómo se está trabajando actualmente la gestión curricular en programas académicos de educación superior.

- **Fase 1: Caracterización de modelos de gestión curricular.** Se realizará una revisión de literatura que permita identificar las características propias de modelos de gestión curricular bajo un contexto de educación superior.
- **Fase 2: Caracterización de modelos y prácticas de gestión ágil.** Se realizará una caracterización de modelos y prácticas ágiles que sean susceptibles a incorporar en el modelo que se pretende diseñar.
- **Fase 3: Diseño del modelo de gestión curricular.** Esta fase comprende el diseño del modelo de gestión curricular con base a lo identificado en las 3 fases anteriores.
- **Fase 4: Validación del modelo.** Para la fase cuatro se utilizará como estrategia de validación la validación por juicio de expertos que permita evaluar la relevancia, fiabilidad y validez del modelo propuesto

3. Resultados Esperados

Se espera identificar los diferentes modelos de gestión curricular que han adoptado las instituciones de educación superior, mediante la aplicación de un instrumento de carácter cualitativo y cuantitativo para establecer un diagnóstico inicial del proceso, finalmente, se realizará una revisión de literatura que permita establecer los componentes que requiere un modelo de gestión curricular genérico con el propósito de que pueda ser adaptado a cualquier institución.

Por otra parte, se analizarán modelos y técnicas ágiles utilizando como mecanismo la revisión de literatura, con el fin de poder establecer las experiencias y mejores prácticas que se puedan incorporar en el modelo de gestión que se pretende diseñar.

Así mismo, se diseñará un modelo de gestión curricular que incorpore el conjunto de componentes y lineamientos estratégicos del proceso, que adopte las técnicas y herramientas ágiles seleccionadas luego de la revisión realizada en las etapas iniciales del proyecto, con el objetivo de propiciar la flexibilidad, participación activa de actores, integración de TIC y evaluación continua. Así mismo, el modelo diseñado podrá ser adaptado por cualquier institución de educación superior que esté interesado en utilizar el modelo como estrategia de innovación del proceso.

Finalmente se diseñará un instrumento de validación para validar el modelo mediante juicio de expertos, en donde se pretende determinar si el modelo diseñado responde adecuadamente a los criterios de agilidad esperados y se pueda determinar la adaptabilidad y replica del mismo.

4. Conclusiones

- Actualmente las universidades enfrentan retos importantes en la gestión curricular, aspectos como la rigidez estructural, la desconexión con el entorno laboral, evolución del

contexto educativo y la falta de una cultura institucional de mejora continua, hace que sea necesario implementar prácticas innovadoras de gestión curricular que permitan subsanar y responder a las necesidades cambiantes del proceso.

- La gestión curricular en la educación superior es un proceso complejo, integral y estratégico, que requiere un enfoque sistémico y de largo alcance y requiere compromiso de todos los actores involucrados. Los modelos tradicionales, se caracterizan por su rigidez y homogeneidad, y éstos, no son suficientes para enfrentar un entorno cambiante y dinámico, por lo tanto, es importante incorporar estrategias que aporten a la innovación del proceso, mediante la adopción de un enfoque ágil.
- La gestión curricular no puede seguir siendo un acto solamente formal o administrativo, sino que debe replantearse como un proceso continuo, participativo, flexible e inclusivo. Finalmente, la transformación de la gestión curricular requiere políticas claras, liderazgo académico, infraestructura tecnológica y una cultura organizacional que supere la resistencia al cambio y adapte el agilismo como estrategia de innovación en el proceso.

Referencias

- Ariza, E. Y. O. (2014). *LA GESTIÓN CURRICULAR EN LA EDUCACIÓN SUPERIOR COLOMBIANA: UNA PROPUESTA DESDE LAS TEORÍAS DE LA COMPLEJIDAD Y LOS FRACTALES*. (Tesis Doctoral, UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA, Bogotá). Descargado de <https://bibliotecadigital.usb.edu.co/server/api/core/bitstreams/41b94960-2752-4839-a638-bcde8a645875/content>
- Dazeley, R., Goriss-Hunter, A., Meredith, G., Sellings, P., Firmin, S., Burke, J., y Panther, B. (2025, abril). Agile Backward Design: A Framework for planning higher education curriculum. *The Australian Educational Researcher*, 52(2), 1489–1508. Descargado 2025-06-03, de <https://doi.org/10.1007/s13384-024-00772-7> doi: 10.1007/s13384-024-00772-7
- Flores-Cerna, F., Sanhueza-Salazar, V.-M., Valdés-González, H.-M., Reyes-Bozo, L., Flores-Cerna, F., Sanhueza-Salazar, V.-M., ... Reyes-Bozo, L. (2022, abril). Metodologías ágiles: un análisis de los desafíos organizacionales para su implementación. *Revista científica*(43), 38–49. Descargado 2025-04-23, de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0124-22532022000100038&lng=en&nrm=iso&tlng=es (Publisher: Universidad Distrital Francisco José de Caldas) doi: 10.14483/23448350.18332
- Gómez, Y. A. (2023). Innovación educativa y gestión curricular.
- Kent, B., Beedle, M., Van, A., Bennekum, Alistair, Cockburn, ... Thomas (2001). *Manifiesto por el Desarrollo Ágil de Software*. Descargado 2025-05-07, de <https://agilemanifesto.org/iso/es/manifiesto.html>
- Letelier Torres, P., y Penadés Gramaje, M. C. (2013). *Una estrategia para la enseñanza de metodologías ágiles*. Asociación de Enseñantes Universitarios de la Informática (AENUI). Descargado 2025-06-03, de <http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/126270> (Accepted: 2022-09-01T08:34:09Z)

- Martín Gómez, S. (2020, enero). Aplicación de las Metodologías Ágiles al proceso de enseñanza-aprendizaje universitario. *Revista d'Innovació Docent Universitària*, 62–73. doi: 10.1344/RIDU2020.12.7
- Neumann, M., y Baumann, L. (2021, junio). *Agile Methods in Higher Education: Adapting and Using eduScrum with Real World Projects*. arXiv. Descargado 2025-06-03, de <http://arxiv.org/abs/2106.12166> (arXiv:2106.12166 [cs]) doi: 10.48550/arXiv.2106.12166
- Nisperuza, E. P. F., Díaz, L. A. M., y Merlano, A. M. H. (2022, abril). El currículo por competencias en la educación superior. Una mirada desde los programas de formación de maestros. *Revista Boletín Redipe*, 11(04), 154–172. Descargado 2025-06-02, de <https://revista.redipe.org/index.php/1/article/view/1807> (Number: 04) doi: 10.36260/rbr.v11i04.1807
- Roberto Hernández Sampieri, Carlos Fernández Collado, y Pilar Baptista Lucio. (2014). *Metodología de la Investigación* (6.^a ed.). McGRAW-HILL.
- Sánchez, H. C., Auccapuri, A. A. H., Ortiz, Z. L., Concha, T. I. R., Ortiz, E. L., y Salinas, L. A. C. (2021, diciembre). Gestión curricular en el desarrollo de las competencias transversales de los estudiantes en una universidad pública. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 5(6), 11887–11918. Descargado 2025-06-02, de <https://ciencialatina.org/index.php/cienciala/article/view/1205> (Number: 6) doi: 10.37811/cl_rcm.v5i6.1205
- Sánchez, J. C. (2017). Universidad Y Globalización: Cambios Y Desafíos. *Praxis & Saber*, 8(18), 113–131. Descargado 2025-05-31, de <https://www.redalyc.org/journal/4772/477254674006/html/>

Panorama de la eficiencia energética eléctrica y la seguridad y salud en el trabajo (riesgo eléctrico) en el proceso de distribución y uso final de la energía eléctrica

Jose Bliuver Aponte Gonzalez¹,

Resumen

Este estudio evalúa la eficiencia energética (EE) y las condiciones de seguridad y salud en el trabajo (SST) en los sectores industrial y comercial del Tolima, Colombia, propone un modelo de gestión sinérgico que integra tecnologías avanzadas (IoT, analítica de datos) con prácticas de prevención de riesgos. En este documento se presenta el análisis de datos comprendido en el periodo 2020 a 2024 en los cuales se aplican normas internacionales (ISO 50001, ISO 45001); asimismo se presentan los resultados enmarcados en búsqueda de reducir pérdidas de energía, mejorar la seguridad laboral y promover prácticas sostenibles, los cuales se encuentran alineados con los ODS 7, 8, 9, 12 y 13, contribuyendo a la competitividad regional y al desempeño ambiental. Finalmente se relaciona un marco metodológico aplicable a economías emergentes para la gestión integrada de EE y SST.

Abstract

This study evaluates energy efficiency (EE) and occupational health and safety (OSH) conditions in the industrial and commercial sectors of Tolima, Colombia, proposing a synergistic management model that integrates advanced technologies (IoT, data analytics) with risk prevention practices. This document presents the analysis of data from the period 2020 to 2024 in which international standards (ISO 50001, ISO 45001) are applied; Likewise, the results framed in search of reducing energy losses, improving workplace safety and promoting sustainable practices are presented, which are aligned with SDGs 7, 8, 9, 12 and 13, contributing to regional competitiveness and environmental performance. Finally, a methodological framework applicable to emerging economies for the integrated management of EE and SST is related.

Palabras clave: Eficiencia energética, Seguridad y salud en el trabajo (SST), Tecnologías emergentes (IoT, analítica de datos), Desarrollo sostenible (ODS) y Gestión integrada.

1. Introducción

La eficiencia energética y las condiciones de seguridad y salud en el trabajo (SST) son pilares esenciales para el desarrollo sostenible, particularmente en el sector energético. Direccionando estos dos pilares al departamento del Tolima se identifican que los procesos de

¹ jose.aponte106251@elpoli.edu.co – PolitecnicoColombianoJaimeIsazaCadavid

distribución y uso final de la energía presentan desafíos significativos y oportunidades para implementar mejoras que impacten positivamente en estos ámbitos.

Esta propuesta tiene como objetivo evaluar la eficiencia energética y las prácticas de Seguridad y Salud en el Trabajo en las actividades relacionadas, identificando áreas de mejora que contribuyan al desarrollo sostenible de la Región. Se pretende incorporar el análisis de tecnologías avanzadas, establecer la propuesta de la implementación de sistemas de gestión de riesgos y el fomento de una cultura de prevención son elementos clave para lograr este objetivo.

De igual forma, se realizará el análisis de cómo la optimización de la eficiencia energética puede disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero y reducir los costos operativos, mientras que la mejora en las condiciones de SST puede potenciar la productividad y el bienestar de los trabajadores. Se establecerá un enfoque dinamizador integral que no solo busca cumplir con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), sino también garantizar un entorno laboral más seguro y eficiente para todos los actores involucrados en el sector energético del Tolima. La investigación se alinea con el compromiso de equilibrar las necesidades energéticas actuales con la conservación de los recursos para las futuras generaciones.

2. Planteamiento del problema

2.1. A Nivel Local (Tolima, Colombia)

En el departamento del Tolima, la eficiencia energética y la seguridad y salud en el trabajo (SST) se han convertido en prioridades estratégicas para impulsar el desarrollo sostenible en el sector energético. Las iniciativas locales han destacado por su enfoque en la modernización de la infraestructura energética, lo que ha permitido reducir las pérdidas en los procesos de transmisión y distribución de energía. Estas mejoras no solo optimizan los recursos disponibles, sino que también contribuyen a la mitigación de los impactos ambientales, como la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero.

Paralelamente, se han implementado programas de capacitación orientados a fortalecer las competencias de los trabajadores y promover una cultura de prevención en el sector. Estas acciones, acompañadas de la adopción de sistemas de gestión de riesgos, han mejorado las condiciones laborales, fomentando entornos más seguros y productivos. De esta manera, se busca no solo cumplir con estándares internacionales de sostenibilidad, sino también garantizar el bienestar de las comunidades y trabajadores involucrados.

Este enfoque integral refleja el compromiso del Tolima con la eficiencia energética y la SST, posicionándolos como elementos clave para enfrentar los desafíos actuales y construir un futuro energético sostenible.

2.2. Nivel Latinoamericano

En América Latina, la eficiencia energética se ha consolidado como un instrumento fundamental para alcanzar el desarrollo sostenible. La Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) ha subrayado los avances logrados en la región mediante la implementación de políticas y programas dirigidos a mejorar el uso de los recursos energéticos. Estas

iniciativas han permitido reducir el consumo energético, disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero y fomentar una mayor competitividad económica.

No obstante, la CEPAL también ha señalado importantes desafíos que aún persisten. Entre ellos, destacan la limitada disponibilidad de financiamiento para proyectos de eficiencia energética, lo que restringe la adopción de tecnologías más avanzadas, y la necesidad de superar barreras institucionales, como la falta de coordinación intersectorial y de marcos regulatorios sólidos. Estas limitaciones dificultan una implementación más amplia y efectiva de las estrategias energéticas sostenibles.

Superar estos obstáculos requiere una acción concertada que integre políticas públicas innovadoras, incentivos económicos y alianzas estratégicas entre los sectores público y privado. Solo así será posible potenciar el impacto de la eficiencia energética como un motor clave para el desarrollo inclusivo y sostenible en América Latina.

2.3. A Nivel Global

A nivel global, la eficiencia energética ha emergido como una prioridad estratégica, impulsada por eventos históricos como la crisis energética de los años 70 y por la creciente urgencia de abordar los efectos del cambio climático. Estos factores han puesto de manifiesto la necesidad de optimizar el uso de los recursos energéticos y reducir la dependencia de fuentes no renovables, al tiempo que se mitigan las emisiones de gases de efecto invernadero.

Organizaciones internacionales como la Agencia Internacional de Energía (IEA) y las Naciones Unidas han desempeñado un papel central en la promoción de políticas y regulaciones destinadas a mejorar la eficiencia energética. Estas iniciativas incluyen el desarrollo de marcos normativos, programas de incentivo económico y la transferencia de tecnologías avanzadas, con el objetivo de apoyar a los países en la adopción de sistemas energéticos más sostenibles.

La eficiencia energética no solo representa una herramienta clave para reducir los impactos ambientales, sino también un medio para garantizar la seguridad energética y fomentar el crecimiento económico sostenible. Su implementación efectiva requiere la colaboración entre gobiernos, sector privado y ciudadanía, estableciendo así una base sólida para un futuro energético resiliente y responsable a nivel global.

3. Justificación

La evaluación de la eficiencia energética y las condiciones de seguridad y salud en el trabajo (SST) en los procesos de transmisión, distribución y uso final de la energía en el departamento del Tolima resulta esencial por su impacto tanto académico como práctico. Este análisis no solo proporciona una visión integral de los retos y oportunidades del sector, sino que también ofrece soluciones innovadoras que benefician tanto a la comunidad académica como a los actores clave del ámbito energético.

A continuación, se relaciona tres hitos frente a la justificación Académica de esta propuesta de investigación, la cual busca co-crear conocimiento, fomentar la innovación y fortalecer el proceso formativo:

- Este estudio aporta datos y análisis valiosos que enriquecen la investigación en eficiencia energética y SST, proporcionando una base sólida para diseñar políticas públicas y estrategias de mejora en la región.
- La investigación impulsa el desarrollo de tecnologías y prácticas innovadoras que optimizan los procesos energéticos y mejoran las condiciones laborales, generando un impacto positivo en el avance tecnológico y económico del departamento.
- Los hallazgos del estudio pueden incorporarse en programas educativos, preparando a una nueva generación de expertos capacitados para liderar la gestión eficiente y segura de la energía en el Tolima y más allá.

Asimismo, se resalta la importancia de este estudio de acuerdo con los hallazgos y resultados que se pretende tener entorno a la reducción de emisiones, ahorro económico en función de lo energético, seguridad y bienestar laboral y apoyo al desarrollo sostenible, siendo estos:

- Incremento en la eficiencia energética contribuye directamente a la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero, ayudando a combatir el cambio climático y promoviendo la sostenibilidad ambiental.
- Mejoras en la eficiencia energética reducen los costos operativos para empresas y consumidores, fortaleciendo la competitividad económica del departamento y promoviendo un uso más sostenible de los recursos.
- La implementación de mejores prácticas de SST disminuye los riesgos laborales, mejorando tanto la seguridad como la calidad de vida de los trabajadores del sector energético.

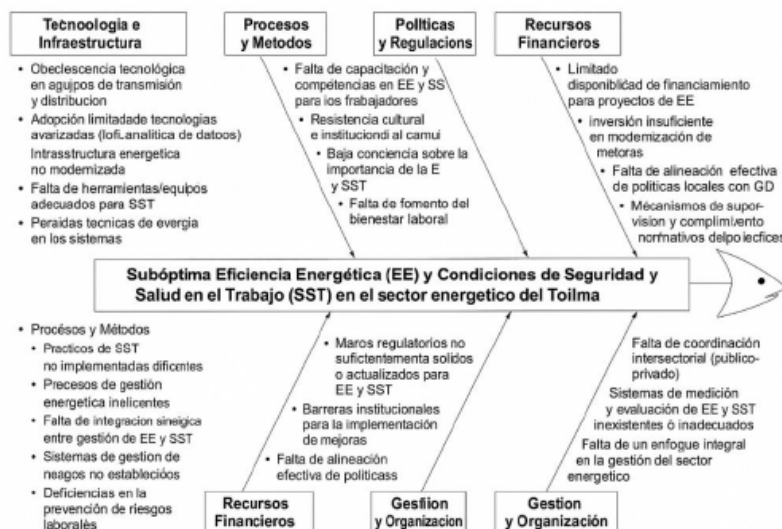


Figura 1: Análisis de la Problemática .

Se requiere la articulación de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), especialmente al ODS 7 (energía asequible y no contaminante) y al ODS 8 (trabajo decente y crecimiento económico), alineándose con los esfuerzos globales por un desarrollo inclusivo y equilibrado.

4. Pregunta de investigación

Conocer el nivel actual de eficiencia energética en los procesos de transmisión y distribución permite identificar áreas críticas que requieren intervención tecnológica y operativa para optimizar el uso de recursos. Asimismo, el análisis de las prácticas de seguridad y salud en el trabajo (SST) resulta esencial para comprender cómo estas influyen en la eficiencia operativa y el bienestar laboral, factores clave en el desempeño del sector. Identificar las barreras que limitan y las oportunidades que promueven mejoras en eficiencia energética y SST proporciona un marco estratégico para enfrentar desafíos como la falta de financiamiento y aprovechar ventajas como el uso de energías renovables. Además, analizar cómo estas mejoras contribuyen al desarrollo sostenible del Tolima permite alinear el sector energético con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), promoviendo beneficios ambientales, sociales y económicos. Finalmente, evaluar el impacto de las políticas y regulaciones actuales en estos aspectos y explorar su optimización asegura una base normativa sólida que potencie los avances hacia un futuro energético más eficiente y responsable. Por tanto, esta propuesta pretende responder como mínimo uno de las siguientes preguntas de investigación:

1. ¿Cuál es el nivel actual de eficiencia energética en los procesos de transmisión y distribución de energía en el departamento del Tolima?
2. ¿Qué prácticas de seguridad y salud en el trabajo (SST) están implementadas en el sector energético del Tolima, y cómo influyen estas prácticas en la eficiencia operativa del sector?
3. ¿Cuáles son las principales barreras que limitan y las oportunidades que favorecen la mejora de la eficiencia energética y las condiciones de SST en el sector energético del Tolima?
4. ¿De qué manera contribuyen las mejoras en eficiencia energética y en las prácticas de SST al desarrollo sostenible del departamento del Tolima?
5. ¿Qué impacto tienen las políticas y regulaciones vigentes sobre la eficiencia energética y las condiciones de SST en el sector energético del Tolima, y cómo pueden optimizarse para alcanzar mejores resultados?

5. Obgetivos

5.1. Objetivo General

Evaluar la eficiencia energética y la seguridad y salud en el trabajo (SST) en el proceso de transmisión, distribución y uso final de la energía en el departamento del Tolima, con el fin de identificar áreas de mejora que contribuyan al desarrollo sostenible de la región.

5.2. Objetivos Específicos

Elaborar un análisis situacional actual de la eficiencia energética en los procesos de transmisión, distribución y uso final de la energía, identificando las principales fuentes de pérdidas y oportunidades de mejora para optimizar el rendimiento y reducir los impactos ambientales.

Determinar las prácticas de SST implementadas en el sector energético del Tolima, analizando su impacto en la eficiencia operativa, la seguridad laboral y el bienestar de los trabajadores, con el fin de proponer estrategias para su fortalecimiento.

Investigar las barreras que limitan y las oportunidades que favorecen la mejora de la eficiencia energética y las condiciones de SST en el sector energético, desarrollando recomendaciones viables y alineadas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) para impulsar la sostenibilidad de la región.

Diseñar una propuesta basada en la implementación de tecnologías avanzadas y estrategias de gestión energética que optimicen los procesos de transmisión, distribución y uso final de la energía en el Tolima, reduciendo pérdidas energéticas y promoviendo la sostenibilidad ambiental y económica del sector.

6. Hipótesis

Este estudio se enmarca en las siguientes hipótesis:

La implementación de tecnologías avanzadas y sistemas de gestión energética innovadores puede reducir de manera significativa las pérdidas de energía durante la transmisión y distribución en el departamento del Tolima, optimizando los recursos disponibles y aumentando la sostenibilidad del sistema energético.

La adopción de mejores prácticas en seguridad y salud en el trabajo (SST) en el sector energético del Tolima incrementará la eficiencia operativa al reducir accidentes laborales, mejorar las condiciones de trabajo y fomentar un entorno laboral más productivo y seguro.

Las principales barreras para mejorar la eficiencia energética en Tolima incluyen la falta de financiamiento, la resistencia cultural e institucional al cambio y la obsolescencia tecnológica. Sin embargo, las oportunidades, como el impulso a las energías renovables y

la modernización de la infraestructura energética, pueden transformar estas limitaciones en ventajas competitivas para el desarrollo sostenible.

Las mejoras en la eficiencia energética y en las condiciones de SST tienen un impacto directo y positivo en el desarrollo sostenible, al reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, fomentar prácticas laborales responsables y elevar la calidad de vida tanto de los trabajadores como de las comunidades relacionadas con el sector energético

Las políticas y regulaciones actuales tienen un impacto significativo en la promoción de la eficiencia energética y las condiciones de SST en Tolima. Sin embargo, una mayor alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), acompañada de mecanismos de supervisión y cumplimiento más eficaces, es necesaria para maximizar su efectividad y garantizar un impacto sostenible a largo plazo.

7. Resultados Esperados

Al finalizar esta investigación, se espera obtener los siguientes resultados concretos y aportes significativos:

Diagnóstico Integral del Estado Actual, se dispondrá de un análisis detallado y cuantificado del nivel de eficiencia energética (EE) en los procesos de transmisión, distribución y uso final de la energía eléctrica, así como de las prácticas de Seguridad y Salud en el Trabajo (SST) implementadas en los sectores industrial y comercial del departamento del Tolima. Este diagnóstico identificará las principales fuentes de pérdidas energéticas y los riesgos laborales predominantes.

Identificación de Barreras y Oportunidades, se identificarán y caracterizarán las principales barreras (tecnológicas, financieras, culturales, institucionales, normativas) que limitan la mejora de la EE y las condiciones de SST, así como las oportunidades (tecnologías emergentes, energías renovables, incentivos, marcos de colaboración) que pueden favorecer su optimización en el contexto del Tolima.

Modelo de Gestión Sinérgico Propuesto, se diseñará y presentará un modelo de gestión sinérgico que integre estratégicamente la EE y la SST, incorporando el uso de tecnologías avanzadas (IoT, analítica de datos) y prácticas de prevención de riesgos. Este modelo buscará optimizar los procesos energéticos, reducir pérdidas, mejorar la seguridad laboral y promover la sostenibilidad.

Recomendaciones Estratégicas y Viables, se formularán recomendaciones específicas y viables, alineadas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 7, 8, 9, 12 y 13), para la implementación de mejoras en EE y SST. Estas recomendaciones estarán dirigidas a los actores clave del sector energético, incluyendo empresas, entidades gubernamentales y la academia.

Marco Metodológico Aplicable, se ofrecerá un marco metodológico validado para la evaluación y gestión integrada de EE y SST, que podrá ser replicado y adaptado por otras economías emergentes o regiones con desafíos similares. Contribución al Conocimiento y

la Sostenibilidad, se determinará la Generación de datos y análisis valiosos que enriquecerán la investigación académica en EE y SST; la evidencia del impacto positivo de la integración de EE y SST en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, el ahorro económico, la mejora de la competitividad regional y el bienestar de los trabajadores; el material base para la incorporación en programas educativos y de capacitación técnica.

8. Conclusiones

Al concluir el estudio, se espera llegar a las siguientes conclusiones fundamentales:

- Viabilidad y Beneficios de la Gestión Integrada, se concluirá que la implementación de un modelo de gestión sinérgico que integre la eficiencia energética (EE) y la Seguridad y Salud en el Trabajo (SST) es viable, y altamente beneficiosa para los sectores industrial y comercial del Tolima, permitiendo optimizar recursos, reducir costos operativos y mejorar la seguridad y el bienestar laboral.
- Impacto de las Tecnologías Avanzadas, se demostrará que la adopción de tecnologías avanzadas, como el Internet de las Cosas (IoT) y la analítica de datos, junto con la aplicación de normas internacionales (ISO 50001, ISO 45001), juega un papel crucial en la reducción significativa de pérdidas de energía y en la mejora proactiva de las condiciones de SST.
- Importancia de Superar Barreras Específicas, se confirmará que barreras como la limitada disponibilidad de financiamiento, la resistencia al cambio y la obsolescencia tecnológica son obstáculos significativos, pero que pueden ser superados mediante estrategias focalizadas, incentivos adecuados y la promoción de una cultura de prevención y eficiencia.
- Contribución Directa al Desarrollo Sostenible, se evidenciará que las mejoras en EE y SST contribuyen directamente al desarrollo sostenible de la región del Tolima, alineándose con múltiples Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), al reducir el impacto ambiental, fomentar el trabajo decente y mejorar la competitividad económica.
- Necesidad de Optimización Normativa y Colaboración, se subrayará la importancia de contar con políticas y regulaciones optimizadas y alineadas con las mejores prácticas internacionales, así como la necesidad de una colaboración efectiva entre el sector público, el sector privado y la academia para maximizar el impacto de las iniciativas de EE y SST.
- Relevancia del Marco Metodológico, se denotará que el marco metodológico desarrollado habrá servido para alcanzar los objetivos del presente estudio en Tolima, y para establecerse como una herramienta útil y adaptable para abordar desafíos similares en otras economías emergentes, promoviendo la gestión integrada de EE y SST a una escala más amplia.

Referencias

- Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía. (2017). Medición y evaluación del rendimiento de proyectos de Eficiencia Energética. *ESMAP*. Recuperado de <https://www.gob.mx/conuee/acciones-y-programas/medicion-y-evaluacion-del-rendimiento-de-proyectos-de-eficiencia-energetica-esmap-2017>
- Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía. (2019). Guía para la Evaluación, Medición y Verificación de la Eficiencia Energética. Recuperado de <https://www.gob.mx/conuee/acciones-y-programas/guia-para-la-evaluacion-medicion-y-verificacion-de-la-eficiencia-energetica-2019>
- Estrategia de eficiencia en el consumo de energía eléctrica y emisiones de contaminantes en México. (2021). *Revista Mexicana de Ciencias Energéticas*, 2(2). Recuperado de https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0186-10422021000200008
- Estrategia de eficiencia en el consumo de energía eléctrica y emisiones de contaminantes en México. (2021). *Revista Mexicana de Ciencias Energéticas*, 2(2). Recuperado de https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0186-10422021000200008
- Fernández Gómez, J. (2021). Eficiencia energética en el sector industrial. *Cuadernos Orkestra*, 02/2021. Recuperado de <https://www.orquestra.deusto.es/images/investigacion/publicaciones/informes/cuadernos-orkestra/210005-Eficiencia-Energ%C3%A9tica-Sector-Industrial-INFORME-COMPETO-.pdf>
- HSE Software. (2021). Seguridad y salud ocupacional en el sector energético: principales riesgos y medidas SST. Recuperado de <https://hse.software/2021/11/08/seguridad-y-salud-ocupacional-en-el-sector-energetico-principales-riesgos-y-medidas-sst/>
- International Energy Agency. (2021). Key World Energy Statistics. Recuperado de <https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2021>
- Introna, V., Cesarotti, V., Benedetti, M., Biagiotti, S., & Rotunno, R. (2014). Energy Management Maturity Model: A Tool to Evaluate and Improve Energy Management in Manufacturing Companies. *Sustainable Production and Consumption*, 2, 51-58. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352550914000025>
- Martínez Pérez, F., & Gassinski, L. (2022). La eficiencia energética y el papel del mantenimiento en la misma. *Ingeniería Energética*, 43(2). Recuperado de http://www.scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59012022000200010
- Ministerio de Minas y Energía de Colombia. (2021). Plan de acción indicativo del programa de uso racional y eficiente de la energía. Recuperado de <https://www.minenergia.gov.co/>
- Piñeres Castillo, A., Cabello Eras, J. J., & Hinojosa Rivera, M. (2022). Factores determinantes para la evaluación de la eficiencia energética en las organizaciones: una visión desde las condiciones de Colombia. *Revista Universidad y Sociedad*, 14(2). Recuperado de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59012022000200010

[S2218-36202022000200509](#)

- Prashar, A. (2017). Adopting ISO 50001: A Diagnostic Model for Energy Management in Manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, 166, 221-236. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652617312065>
- Sa, A., & Silva, M. (2017). Energy Efficiency in Industry: ISO 50001 and Energy Management Maturity Model. *Energy Procedia*, 136, 102-110. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217353645>

Pirólisis de residuos agroindustriales de banano como estrategia sostenible en el Urabá Antioqueño bajo el esquema de una biorrefinería termoquímica apoyado en simulación computacional

Efraín Villegas¹,

Resumen

La agroindustria bananera en la región del Urabá Antioqueño, Colombia, genera masivos volúmenes de residuos lignocelulósicos, cuya gestión inadecuada provoca graves impactos ambientales como la contaminación de suelos y la emisión de gases de efecto invernadero, además de representar una considerable pérdida de valor económico. Frente a esta problemática, persiste una brecha de conocimiento sobre la aplicación de tecnologías de valorización adaptadas al contexto regional.

El objetivo principal de esta investigación es evaluar la viabilidad técnica, ambiental y económica de la valorización de estos residuos mediante un proceso de pirólisis integrado en un esquema de biorrefinería termoquímica. La metodología se centrará en el uso de la simulación computacional con el software Aspen Plus como herramienta clave para el diseño y la optimización del proceso. Esto incluye la caracterización fisicoquímica de la biomasa., el desarrollo de un modelo de simulación validado, la realización de análisis de sensibilidad para identificar condiciones operativas óptimas y la ejecución de un análisis de ciclo de vida (ACV) y una evaluación tecno-económica (TEA) para medir la sostenibilidad integral del sistema. Se espera que los resultados proporcionen lineamientos técnicos y económicos claros que demuestren el potencial de esta tecnología para transformar un problema ambiental en una oportunidad de desarrollo. Se espera que el estudio llene el vacío de conocimiento existente., proporcionando una base científica sólida que permita transformar un problema regional en una oportunidad para el desarrollo de una economía circular., mitigando el impacto ambiental y fomentando la diversificación económica en Urabá.

Palabras Claves: Residuos Agroindustriales de Banano, Biorrefinería Termoquímica, Pirólisis, Simulación Computacional.

Abstract

The banana agroindustry in the Urabá region of Antioquia, Colombia, generates large volumes of lignocellulosic waste, whose inadequate management leads to severe environmental impacts such as soil contamination and greenhouse gas emissions, as well as representing a significant loss of economic value. In light of this issue, a notable knowledge gap persists regarding the application of waste valorization technologies tailored to the regional context.

The primary objective of this research is to assess the technical, environmental, and economic feasibility of valorizing these residues through a pyrolysis process integrated within a thermochemical biorefinery framework. The methodology will focus on the use of computational simulation with Aspen

¹ efrainvillegas@elpoli.edu.co- Politecnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid

Plus software as a key tool for process design and optimization. This includes the physicochemical characterization of the biomass, the development of a validated simulation model, the execution of sensitivity analyses to identify optimal operating conditions, and the implementation of a life cycle assessment (LCA) and a techno-economic analysis (TEA) to evaluate the overall sustainability of the system.

The expected outcomes aim to provide clear technical and economic guidelines that demonstrate the potential of this technology to transform an environmental problem into a development opportunity. This study seeks to bridge the existing knowledge gap by providing a solid scientific foundation to convert a regional challenge into a pathway for advancing a circular economy, mitigating environmental impacts, and fostering economic diversification in Urabá

Palabras clave: *Banana Agro-industrial Waste, Thermochemical Biorefinery, Pyrolysis, Computational Simulation*

1. Introducción

La creciente presión demográfica global y la intensificación de las actividades industriales han generado una demanda sin precedentes de energía y materiales, exacerbando al mismo tiempo preocupaciones críticas sobre el agotamiento de los recursos fósiles y el impacto ambiental asociado, en particular el cambio climático (Adeniyi & Ighalo, 2018). En este contexto, la biomasa emerge como un recurso renovable fundamental y un pilar estratégico para la transición hacia sistemas energéticos y productivos más sostenibles (Carlos Lozano Medina et al., 2024a; Sanoja-López et al., 2024). Su capacidad inherente para capturar y almacenar energía solar mediante la fotosíntesis, su disponibilidad a partir de diversas fuentes como residuos agrícolas, forestales y de la industria alimentaria, y su potencial para reducir las emisiones netas de gases de efecto invernadero (GEI) la posicionan como un componente esencial en la promoción de una economía circular y la diversificación de la matriz energética global (Sanoja-López et al., 2024).

Dentro de la amplia gama de fuentes de biomasa, los residuos agrícolas y agroindustriales representan un volumen considerable de material orgánico a menudo subutilizado (Sawarkar et al., 2022; Zaini et al., 2023). La disposición inadecuada de estos desperdicios, ya sea por acumulación en vertederos o quema a cielo abierto, genera significativas preocupaciones ambientales, incluyendo la contaminación del suelo y el agua, así como la emisión de GEI (Castillo-Retamal et al., 2023). Paralelamente, esta gestión ineficiente representa una considerable pérdida económica al no aprovechar el valor potencial contenido en estos subproductos (Guerrero et al., 2018).

En este escenario, el banano (*Musa spp.*), siendo uno de los cultivos tropicales más producidos a nivel mundial, genera cantidades masivas de residuos agroindustriales (Priyadarsini et al., 2023). Partes de la planta como el raquis, el pseudotallo, las hojas y, especialmente, las cáscaras de la fruta (que pueden representar entre el 30 % y el 40 % del peso total del fruto), a menudo descartadas después de la cosecha y el procesamiento, constituyen una problemática ambiental y económica significativa debido a su volumen y lenta descomposición (Carlos Lozano Medina et al., 2024a). A pesar de su alto contenido lignocelulósico y de carbohidratos, que les confiere un considerable valor energético y material, estos residuos permanecen en

gran medida subutilizados, con aplicaciones limitadas a usos de bajo valor como fertilizante o alimento animal (Jayanthi et al., 2024).

La biorrefinería se presenta como una estrategia integral para abordar la problemática de los residuos biomásicos, permitiendo su conversión eficiente en una diversidad de productos de alto valor agregado, que van desde biocombustibles y productos químicos hasta materiales avanzados y energía (Sanoja-López et al., 2024). Este enfoque no solo contribuye a la gestión sostenible de residuos, sino que también impulsa el desarrollo de nuevas industrias y cadenas de valor, especialmente en entornos rurales (Carlos Lozano Medina et al., 2024b).

Dentro de las diversas plataformas de conversión de biomasa exploradas en el contexto de las biorrefinerías, los procesos termoquímicos, particularmente la pirólisis, han demostrado ser altamente versátiles y prometedores para residuos lignocelulósicos (Sanoja-López et al., 2024). La pirólisis, un proceso de termoconversión en ausencia parcial o total de oxígeno a temperaturas elevadas (generalmente entre 300 °C y 900 °C), transforma la biomasa en bio-óleo, biochar (carbón vegetal) y gases no condensables (gas de síntesis) (Premchand et al., 2023). La versatilidad de esta técnica radica en su capacidad para generar una gama de productos con potenciales aplicaciones en los sectores energético, químico y de materiales (Pardo et al., 2023).

El diseño y la optimización de procesos complejos como los de una biorrefinería termoquímica requieren herramientas avanzadas que permitan evaluar su factibilidad técnica y económica, así como identificar parámetros operativos óptimos y posibles cuellos de botella (Requejo & Santos, n.d.). En este sentido, la simulación computacional, utilizando software especializado como Aspen Plus, se ha consolidado como una herramienta fundamental para el análisis, diseño conceptual y escalamiento de procesos industriales, ofreciendo un enfoque riguroso y eficiente que reduce la necesidad de experimentación extensiva y costosa (Sakheta et al., 2023).

A pesar del potencial de la pirólisis para la valorización de residuos de banano y la disponibilidad de herramientas de simulación avanzada, existe una brecha de conocimiento significativa respecto a la aplicación sistemática de este proceso a los volúmenes y tipos específicos de residuos generados en regiones agrícolas particulares. El Urabá Antioqueño en Colombia, siendo una de las principales zonas productoras de banano en el país, enfrenta desafíos específicos en la gestión de sus residuos, para los cuales una estrategia de biorrefinería termoquímica basada en pirólisis podría ofrecer una solución sostenible e innovadora en el contexto rural (Henao et al., 2021). Sin embargo, se carece de una evaluación detallada y respaldada por simulación computacional que permita establecer lineamientos claros para la valorización termoquímica de estos residuos en este contexto regional específico.

Por consiguiente, el objetivo principal de esta investigación es evaluar el potencial de valorización termoquímica de residuos de banano provenientes de la región del Urabá Antioqueño mediante el proceso de pirólisis, apoyado en simulación computacional con Aspen Plus, que permita el establecimiento de lineamientos para la producción sostenible de diferentes productos con alto valor agregado en el contexto de una biorrefinería rural. Se espera que los resultados de este estudio contribuyan significativamente a la comprensión y el aprovechamiento del potencial de los residuos de banano de Urabá, ofreciendo una ruta para la gestión sostenible de residuos, la generación de valor económico en el sector rural y la mitigación del impacto ambiental asociado a la producción de banano en la región.

2. Marco referencial

El Concepto de Biorrefinería Aplicado a Residuos de Banano:

El concepto de biorrefinería se refiere a una instalación o un conjunto integrado de procesos que convierten biomasa en un amplio espectro de productos, incluyendo combustibles, energía (electricidad y/o calor), productos químicos y materiales (Redondo-g et al., 2020). De manera análoga a las refinerías de petróleo, que fraccionan el crudo en Múltiples productos, las biorrefinerías buscan maximizar el valor extraído de la biomasa, minimizando al mismo tiempo la generación de residuos y el impacto ambiental, bajo los principios de la economía circular y la sostenibilidad (Carvalho et al., 2024). La principal diferencia radica en la materia prima: las refinerías de petróleo utilizan un recurso fósil no renovable, mientras que las biorrefinerías se basan en biomasa, un recurso renovable. Las biorrefinerías a partir de la biomasa, pueden potencialmente conducir a un mejoramiento ambiental, social y económico de las agroindustrias y aumentar la sostenibilidad en el contexto nacional e internacional, lo anterior, además de brindar oportunidades a lo largo de toda la cadena de suministro, favorece el desarrollo económico (García, J.A., Varón, D., Barrera, 2019) (Ver figura 1).

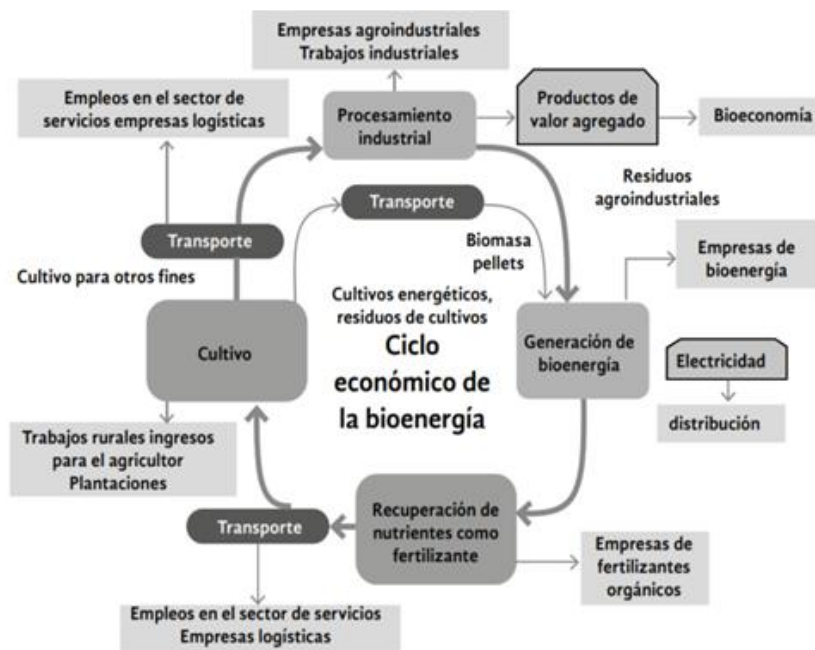


Figura 1: Diagrama conceptual del ciclo económico de la bioenergía (García 2019).

Las biorrefinerías pueden clasificarse según la materia prima que utilizan, las plataformas de conversión (tecnologías) que emplean y los productos intermedios o finales que generan. En el contexto de la valorización de residuos de banano mediante pirólisis, se habla de una biorrefinería termoquímica (Premchand et al., 2023). Este tipo de biorrefinería utiliza procesos termoquímicos como la pirólisis o la gasificación como tecnologías centrales de conversión. Las biorrefinerías se clasifican según su ruta de conversión las cuales pueden ser por gasificación,

pirólisis y digestión anaerobia. (Aristizábal-Alzate et al., 2020)

Una biorrefinería basada en la pirólisis de residuos de banano podría integrar varias etapas y productos:

Pretratamiento de la biomasa: Incluye la recepción, limpieza, reducción de tamaño (molienda/astillado) y, principalmente, el secado de los residuos de banano para reducir su alto contenido de humedad a niveles aceptables para la pirólisis (idealmente <10-15

Conversión por Pirólisis: La biomasa pretratada se somete a pirólisis (preferiblemente rápida si se busca maximizar el bioaceite) para producir bioaceite, biocarbón y gases no condensables, tal como se muestra en la figura 2 (Biswas et al., 2019).

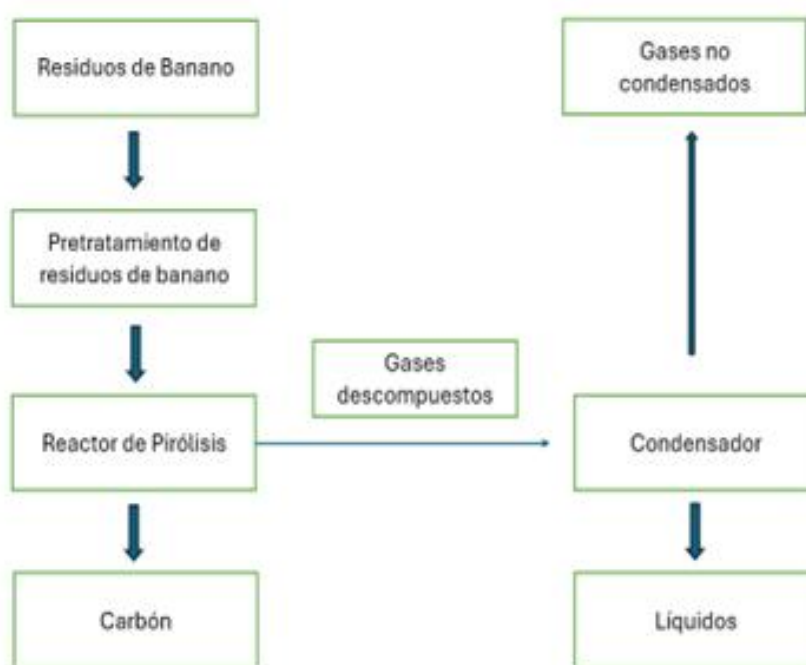


Figura 2: Diagrama de flujo del proceso de pirólisis de residuos de banano (Biswas y col 2019).

Separación y Acondicionamiento de Productos.

El biocarbón se separa de los vapores y puede comercializarse directamente como enmienda de suelo, combustible sólido, o ser activado para producir carbón activado(Alvarado López et al., 2021). Los vapores pirolíticos se condensan para obtener bioaceite y una fase acuosa. El bioaceite puede requerir mejora (por ejemplo, hidrotratamiento, esterificación, emulsificación) para mejorar sus propiedades como combustible o para extraer fracciones químicas valiosas (fenoles, ácido acético)(Chai et al., 2022). Los gases no condensables (sínegas de pirólisis) se limpian de partículas y alquitranes residuales, pueden utilizarse para generar el calor requerido en el secador de biomasa y/o en el reactor de pirólisis, contribuyendo a la autosuficiencia energética del sistema(García, J.A., Varón, D., Barrera, 2019). El excedente puede usarse para generar electricidad o, tras un reformado para ajustar la relación H/CO, como materia prima

para la síntesis de metanol, combustibles Fischer-Tropsch u otros productos químicos(Kumari et al., 2025). La integración de estos procesos dentro de una biorrefinería ofrece ventajas significativas sobre la producción de un único producto. Permite una mayor flexibilidad para adaptarse a las fluctuaciones del mercado de los diferentes productos, mejora la economía global del proceso al generar múltiples flujos de ingresos, y optimiza el uso de los recursos al valorizar todas las fracciones de la biomasa(Chen et al., 2024). Además, la integración energética, como el uso de gases de pirólisis para el secado o la generación de vapor, puede reducir significativamente los costos operativos y mejorar la eficiencia energética global del sistema(Méndez-Durazno et al., 2024). La diversificación de productos también reduce el riesgo económico asociado a la dependencia de un solo mercado.

Simulación Computacional en el Diseño y Optimización de Biorrefinerías de Pirólisis.

La simulación computacional se ha consolidado como una herramienta esencial y poderosa en la ingeniería de procesos, desempeñando un papel crucial en el diseño, análisis, optimización y evaluación de sistemas complejos como la pirólisis de biomasa y las biorrefinerías integradas(Sakheta et al., 2023; Volpato Maroldi et al., 2024). Su aplicación permite a los investigadores e ingenieros explorar una amplia gama de escenarios operativos, evaluar la viabilidad técnica y económica, y predecir el comportamiento ambiental de los procesos antes de incurrir en los altos costos y riesgos asociados con la experimentación a escala piloto o industrial(Méndez-Alva et al., 2018).

En el contexto de la pirólisis de residuos de banano para una biorrefinería en el Urabá Antioqueño, la simulación computacional puede abordar varios aspectos clave:

Modelado del Proceso de Pirólisis: Se pueden desarrollar modelos que describen la cinética de las reacciones de pirólisis y la termodinámica del sistema(Mohamad Jai, 2022). Los modelos buscan predecir la velocidad de descomposición de la biomasa (celulosa, hemicelulosa, lignina) y la formación de los productos (bioaceita, biocarbón, gases) en función de la temperatura, tiempo de residencia y otras variables(Moreda et al., 2024). Los modelos termodinámicos, a menudo basados en la minimización de la energía libre de Gibbs, pueden predecir la composición de equilibrio de los productos, especialmente útil para sistemas a alta temperatura como la gasificación o el reformado de gases de pirólisis(Chen et al., 2024).

Diseño y Optimización de Reactores: La simulación, a menudo empleando herramientas de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), permite analizar el flujo de fluidos, la transferencia de calor y masa dentro de diferentes configuraciones de reactores de pirólisis (por ejemplo, lecho fijo, lecho fluidizado)(Saini et al., 2024). Esto ayuda a optimizar el diseño del reactor para mejorar la eficiencia de conversión y la selectividad hacia los productos deseados.

Simulación de Plantas de Biorrefinería Completas: Programas de simulación de procesos como ASPEN Plus y Diseñador SuperPro, permiten construir diagramas de flujo detallados de toda la biorrefinería(Gómez et al., 2022; Mo et al., 2022). Esto incluye todas las unidades de operación: pretratamiento de la biomasa (secado, molienda), reactor de pirólisis, sistemas de separación de productos (ciclones, condensadores, columnas de destilación), unidades de bioaceite, y sistemas de aprovechamiento energético de gases y biocarbón.(Ighalo Adeniyi, 2019) utilizaron ASPEN Plus para una simulación termodinámica de la pirólisis de residuos de banano, modelando la revisión en celulosa, hemicelulosa y lignina y utilizando reactores para el equilibrio químico y de fases. También se ha empleado SuperPro Designer

para simular procesos de producción de alimentos para ganado a partir de residuos de plátano, demostrando la versatilidad de estas herramientas para biomásas similares (Gómez et al., 2022).

Análisis de Sensibilidad y Optimización de Parámetros: Una vez que el modelo de simulación está validado con datos experimentales o de la literatura, se pueden realizar análisis de sensibilidad para estudiar cómo las variaciones en los parámetros operativos (temperatura de pirólisis, relación vapor/biomasa en gasificación, tiempo de residencia) afectan los rendimientos de los productos, la calidad del bioaceite, el consumo energético y los costos. Algoritmos de optimización, como la optimización por enjambre de partículas (PSO) empleadas en investigaciones para sistemas de conversión de cáscara de banano a energía, pueden integrarse con los modelos de simulación para encontrar las condiciones operativas óptimas que maximicen un objetivo (rendimiento de bioaceite, eficiencia energética) o minimicen otro (costos, emisiones) (Fang et al., 2025).

Evaluación Tecnoeconómica (TEA): Los simuladores de procesos suelen incluir módulos para estimar los costos de capital (CAPEX) y los costos de operación (OPEX) de la planta. Esto permite realizar análisis de rentabilidad, calcular el precio de venta mínimo de los productos, el valor actual neto (VAN), la tasa interna de retorno (TIR) y el período de recuperación de la inversión, lo cual es fundamental para la toma de decisiones sobre la viabilidad comercial del proyecto (Bedoya Betancur et al., 2022).

Análisis de Ciclo de Vida (ACV) y Evaluación Ambiental: La simulación proporciona los balances de masa y energía detallados que son necesarios como inventario para realizar un ACV. Esto permite cuantificar los impactos ambientales potenciales del proceso de biorrefinería a lo largo de toda su cadena de valor, desde la recolección de la biomasa hasta la producción y uso de los productos finales, incluyendo emisiones de GEI, consumo de agua y generación de residuos secundarios (Patel et al., 2024).

Escalamiento de Procesos: La simulación ayuda a predecir el comportamiento del proceso a diferentes escalas de producción, facilitando el diseño de plantas piloto y la extrapolación a escala industrial.

El uso de modelos termodinámicos (basados en el equilibrio) es a menudo un primer paso, especialmente para procesos como la gasificación o la combustión, ya que requieren menos datos cinéticos detallados. Sin embargo, para la pirólisis, donde las reacciones a menudo no alcanzan el equilibrio debido a los cortos tiempos de residencia, los modelos cinéticos son más apropiados para predecir con precisión la distribución de productos. La combinación de diferentes tipos de modelos y su validación experimental son clave para desarrollar simulaciones robustas y confiables que puedan guiar exitosamente el desarrollo y la implementación de biorrefinerías de pirólisis para los residuos de banano en el Urabá Antioqueño.

3. Planteamiento del Problema

La agroindustria bananera en el Urabá Antioqueño, motor económico y social de la región y responsable de cerca del 75 % de la producción nacional, genera anualmente un volumen masivo de residuos lignocelulósicos, constituidos principalmente por raquis, hojas y pseudotallos, que representan aproximadamente el 80 % de la biomasa total del cultivo (Ministerio

de Agricultura y Desarrollo Rural, Cadena De Banano Dirección de Cadenas Agrícolas y Forestales, 2021). La gestión predominante de estos residuos es la disposición inadecuada en campo abierto (más del 85 %), una práctica que conlleva graves impactos ambientales, tales como la degradación del suelo y cuerpos de agua, la emisión de gases de efecto invernadero, y la proliferación de plagas(Araújo, 2018). Esta situación no solo compromete la sostenibilidad ambiental local, sino que también incumple con los compromisos adquiridos por Colombia en el marco de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 7, 9, 12, 13) y el Acuerdo de París (Di Pietro, 2017). Frente a este desafío ambiental y la necesidad de transitar hacia modelos productivos más circulares, la pirólisis emerge como una tecnología clave dentro del paradigma de biorrefinería termoquímica para la valorización energética y material de la biomasa residual(Güleç et al., 2023). Sin embargo, a pesar del vasto potencial que ofrece esta tecnología y la abundante disponibilidad de materia prima en el Urabá, persiste en Colombia, y de manera particularmente acentuada en esta región bananera, un vacío científico-tecnológico y de modelos de proceso que hayan sido optimizados y evaluados rigurosamente para las condiciones particulares y los tipos de residuos de banano predominantes en la región del Urabá(Ramirez Malule et al., 2024). Esta brecha de conocimiento impide el diseño y desarrollo de soluciones de valorización que sean técnica, económica y ambientalmente viables y adaptadas al contexto local, limitando así la transición hacia una economía circular y obstaculizando el pleno aprovechamiento de este recurso para el desarrollo regional sostenible(Aguiar et al., 2022). La ausencia de estudios que empleen de manera sistemática la simulación computacional para el diseño(ver figura 3), la optimización paramétrica y la evaluación integral (tecno-económica y ambiental) de dichos sistemas de pirólisis y biorrefinería en este contexto específico restringe severamente la capacidad de los actores locales para tomar decisiones informadas y estratégicas respecto a la inversión, el desarrollo y el escalado de tecnologías de valorización apropiadas.

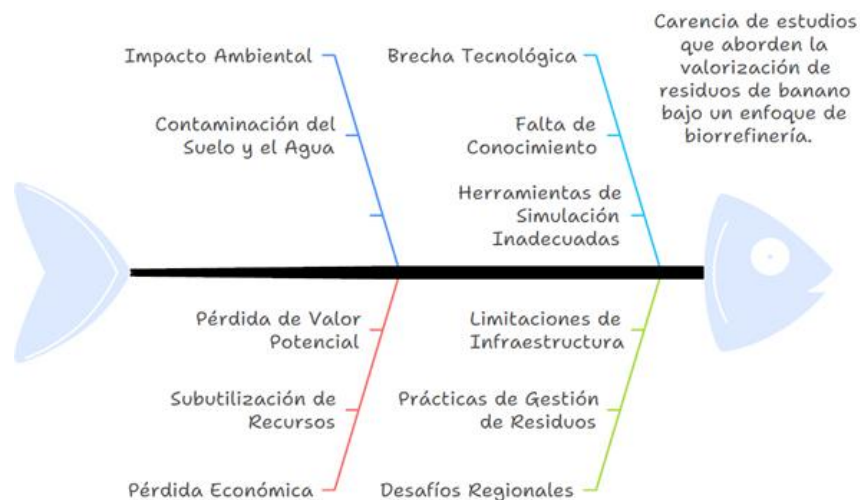


Figura 3: Diagrama de problema Identificado

Este vacío investigativo y tecnológico, representa una significativa oportunidad de innovación tecnológica que aún no ha sido capitalizada eficazmente en el Urabá(Henao et al., 2021).

La carencia de estudios aplicados que aborden la valorización de los residuos de banano bajo un enfoque de biorrefinería termoquímica, en un territorio que combina una alta vulnerabilidad social y económica con una extraordinaria riqueza agroindustrial, constituye una brecha crítica que limita el desarrollo sostenible (Volpato Maroldi et al., 2024). La ausencia de un ecosistema de innovación tecnológica robusto y articulado que integre la academia, la industria y el gobierno dificulta la materialización de soluciones tecnológicas adaptadas.

4. Justificación

La imperante necesidad global de transitar hacia modelos productivos y energéticos más sostenibles, impulsada por el agotamiento de los recursos fósiles y las crecientes preocupaciones ambientales derivadas del cambio climático, posiciona a la biomasa como un recurso estratégico fundamental (Joshi et al., 2024). Su carácter renovable, su capacidad de captura de carbono y su amplia disponibilidad, particularmente en forma de residuos agroindustriales, la convierten en un pilar clave para el desarrollo de una economía circular y la diversificación de la matriz energética (Vuppaladadiyam et al., 2023). Sin embargo, la gestión inadecuada de estos voluminosos subproductos orgánicos, como los generados por la agroindustria bananera, persiste como una problemática ambiental y económica significativa en muchas regiones del mundo, incluida Colombia (Salcedo-Puerto et al., 2025). El Urabá Antioqueño, un área vital para la economía colombiana y principal productor de banano, enfrenta desafíos considerables en la disposición de los extensos volúmenes de residuos lignocelulósicos derivados del cultivo (Patil et al., 2024). La práctica predominante de su abandono o quema a cielo abierto no solo compromete la salud de los ecosistemas locales, afectando el suelo y el agua, y contribuye a la emisión de gases de efecto invernadero y la proliferación de plagas, sino que también representa una pérdida tangible de valor económico al desaprovechar el potencial energético y material inherente en esta biomasa (Redondo-g et al., 2020). Esta situación contrasta con los compromisos nacionales e internacionales en materia de desarrollo sostenible, como los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y el Acuerdo de París (Objetivos de Desarrollo Sostenible - Secretaría Seccional de Salud y Protección Social de Antioquia, 2023). Ante este panorama, la valorización de estos residuos emerge como una vía prometedora para mitigar los impactos ambientales y generar nuevas oportunidades económicas (Sanoja-López et al., 2024). La biorrefinería termoquímica, centrada en procesos como la pirólisis, ofrece una estrategia integral para convertir la biomasa residual en una gama diversa de productos de alto valor, tales como bioaceites, biocarbón y gases combustibles (Ortiz-Sanchez et al., 2023). Esta tecnología, aunque ampliamente estudiada en otros contextos, requiere una evaluación específica y adaptada a las características particulares de los residuos de banano predominantes en el Urabá y a las condiciones operativas que optimicen la producción de productos de interés comercial y ambientalmente deseables (Mendonça et al., 2025). A pesar del potencial de la pirólisis y de la disponibilidad de herramientas avanzadas de simulación computacional, esenciales para el diseño riguroso, la optimización paramétrica y la evaluación integral de procesos complejos como los de una biorrefinería (Ortiz-Sanchez Cardona Alzate, 2024; Vuppaladadiyam et al., 2023), existe un vacío de conocimiento crucial en el contexto regional del Urabá. Se carece de estudios detallados, respaldados por modelos de simulación validados, que permitan com-

prender a fondo el comportamiento termoquímico de estos residuos específicos, optimizar las condiciones de pirólisis y evaluar la viabilidad técnica, económica y ambiental de su integración en un esquema de biorrefinería rural (Alcívar-Bravo et al., 2022). Esta brecha impide la formulación de lineamientos claros y la toma de decisiones informadas por parte de los actores locales (industria, gobierno, academia) respecto a la inversión y el escalamiento de soluciones tecnológicas apropiadas. Por lo tanto, esta investigación se justifica en la necesidad de llenar este vacío de conocimiento y proporcionar una base científica y tecnológica sólida para la valorización sostenible de los residuos de banano en el Urabá Antioqueño. Mediante la aplicación sistemática de la simulación computacional, se busca diseñar y evaluar conceptualmente un proceso de biorrefinería termoquímica que maximice la recuperación de valor de esta biomasa. Los resultados esperados no solo contribuirán a la gestión ambientalmente responsable de los residuos, transformando un problema en una oportunidad, sino que también impulsarán la diversificación económica del sector rural, la generación de empleo cualificado y el fortalecimiento de un modelo de desarrollo regional más resiliente y alineado con los principios de la economía circular, sentando las bases para un potencial paradigma de residuo cero.^{en} la agroindustria bananera.

5. Pregunta problema

¿Cuál es la viabilidad técnica, ambiental y económica de la valorización de los principales residuos agroindustriales de banano generados en el Urabá Antioqueño mediante un proceso de pirólisis integrado en un esquema de biorrefinería termoquímica, cuyo diseño y operación sean optimizados a través de la aplicación de herramientas de simulación computacional?

6. Objetivo General

Evaluar el potencial de valorización termoquímica del residuos de banano proveniente de la región del Urabá Antioqueño mediante el proceso de pirólisis, apoyado en simulación computacional con Aspen Plus, con miras a lineamientos para la producción sostenible de biocombustibles en el contexto de una biorrefinería rural.

7. Objetivos Específicos

Evaluar el potencial de residuos agroindustriales de banano como materia prima lignocelulósica para procesos de pirólisis, mediante la obtención y análisis de sus propiedades fisicoquímicas (composición elemental, análisis próximo y comportamiento térmico), con el fin de establecer criterios técnicos que justifiquen su aprovechamiento en esquemas de valorización energética y material.

Desarrollar un modelo de simulación del proceso de pirólisis en Aspen Plus a partir de las características de los residuos de banano y las condiciones experimentales, con el propósito de representar y analizar el comportamiento del sistema bajo diferentes escenarios operacionales.

Analizar el impacto de variables críticas del proceso de pirólisis (como temperatura, tiempo de residencia y composición del gas inerte) a través de estudios de sensibilidad computacio-

nal, con el fin de identificar condiciones óptimas para maximizar la generación de diferentes productos de alto valor agregado.

Comparar los resultados obtenidos mediante simulación con los datos experimentales mediante análisis estadístico, con el propósito de evaluar la precisión y confiabilidad del modelo como herramienta predictiva para el escalado y optimización del proceso en escenarios rurales.

Realizar un análisis de ciclo de vida, un análisis económico y una evaluación de la sostenibilidad del modelo en el contexto de una biorrefinería rural

8. Hipótesis

La valorización termoquímica de los principales residuos agroindustriales de banano generados en el Urabá Antioqueño, mediante un proceso de pirólisis integrado en un esquema de biorrefinería y optimizado a través de simulación computacional con software especializado (como Aspen Plus), permitirá identificar un conjunto de condiciones operativas técnicamente factibles y ambientalmente favorables que conduzcan a la producción de bioaceite, biocarbón y gases con características y rendimientos que, al ser evaluados en un contexto tecno económico, demuestren el potencial de viabilidad para la implementación de una solución sostenible de valorización en la región del Urabá, contribuyendo así a mitigar el impacto ambiental y fomentar el desarrollo económico rural.

9. Resultados Esperados

Obtención de un perfil detallado de las propiedades fisicoquímicas y térmicas de los residuos de banano del Urabá, confirmando su potencial como materia prima para pirólisis.

Desarrollo y validación de un modelo de simulación preciso del proceso de pirólisis de residuos de banano en Aspen Plus, capaz de predecir el rendimiento de productos bajo diversas condiciones operativas.

Identificación de las condiciones óptimas de operación del proceso de pirólisis, a través de estudios de sensibilidad computacional, para maximizar la producción de bioaceite, biocarbón y gases con alto valor agregado.

Resultados cuantitativos del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) que demuestren la reducción del impacto ambiental de la gestión de residuos de banano mediante este enfoque, en comparación con las prácticas actuales.

Resultados del Análisis Tecno-Económico (TEA) que evalúen la viabilidad financiera del esquema de biorrefinería rural basado en pirólisis, incluyendo estimaciones de costos, ingresos y rentabilidad.

Una evaluación integral de la sostenibilidad (técnica, ambiental y económica) del modelo de biorrefinería propuesto para el contexto específico del Urabá Antioqueño.

Establecimiento de lineamientos técnicos y económicos claros que sirvan como base para la toma de decisiones informadas respecto a la implementación y escalamiento de soluciones de valorización de residuos de banano en la región

10. Referencias

- Adeniyi, A. G., Ighalo, J. O. (2018). Handbook of Environmental Materials Management. Handbook of Environmental Materials Management, January. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-58538-3>
- Aguiar, S., Enríquez Estrella, M., Uvidia Cabadiana, H. (2022). Residuos agroindustriales: su impacto, manejo y aprovechamiento. *Axioma*, 1(27), 5–11. <https://doi.org/10.26621/ra.v1i27.8>
- Alcívar-Bravo, A. A., Velásquez-Bazurto, S. D., Baquerizo Crespo, R. J., Riera, M. A. (2022). Diseño de una Biorrefinería para la Obtención de Bioproductos a partir de Residuos Lignocelulósicos. *Revista Técnica De La Facultad De Ingeniería Universidad Del Zulia*, 172–184. <https://doi.org/10.22209/rt.v45n3a04>
- Alvarado López, M., Cevallos Pionce, M., Alcívar Bravo, J., Dueñas Vera, E., Riera, M. A. (2021). RESIDUOS DEL BANANO (*Musa paradisiaca*) como materia prima alternativa en la elaboración de papel. *Colón Ciencias, Tecnología y Negocios*, 8(1), 35–46. <https://doi.org/10.4820>
- Araújo, F. H. (2018). ODS en. In *ODS en Colombia: Los retos para 2030*
- Aristizábal-Alzate, C. E., Alvarado, P. N., Vargas, A. F. (2020). Biorefinery concept applied to phytochemical extraction and bio-syngas production using agro-industrial waste biomass: A review. *Ingeniería e Investigación*, 40(2), 22–36. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.v4i>
- Bedoya Betancur, S., Rolando, A., Zapata, B., Nelly, A., Arias, A. (2022). Simulación y evaluación tecno-económica de la producción de Ácido Clavulánico en Colombia Tesis de maestría presentada para optar al título de Magíster en Ingeniería. www.udea.edu.co
- Biswas, S., Islam, M. A., Saha, S. (2019). Biofuels Extraction through Pyrolysis of Banana Waste. November. <https://www.researchgate.net/publication/337648940>
- Carlos Lozano Medina, J., Henríquez Concepción, V., Mendieta Pino, C. A., León Zerpa, F. (2024a). Bioethanol from canary banana waste as an energy source to reduce the carbon footprint of island electricity systems. *Fuel*, 371(March). <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131848>
- Carlos Lozano Medina, J., Henríquez Concepción, V., Mendieta Pino, C. A., León Zerpa, F. (2024b). Bioethanol from canary banana waste as an energy source to reduce the carbon footprint of island electricity systems. *Fuel*, 371(May). <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131848>
- Carvalho, D. G., Piacentini, J. N., Trierweiler, L. F., Trierweiler, J. O. (2024). Exploring the biorefinery potential of sweet potato crop residues through torrefaction and pyrolysis: Processing of leaves, stems, and peel. *Biomass and Bioenergy*, 187(April). <https://doi.org/10.1016/j.b>
- Castillo-Retamal, F., Cordero-Tapia, F., Aguilar-Correa, C. (2023). Educación Ambiental en el currículo universitario chileno: invisibilidad en la formación de profesores. *Revista De Investigación*, 47(110), 235–250. <https://doi.org/10.56219/revistadeinvestigacin.v47i110.2051>
- Chai, Y., Bai, M., Chen, A., Peng, L., Shao, J., Luo, S., Deng, Y., Yan, B., Peng, C. (2022). Valorization of waste biomass through fungal technology: Advances, challenges, and prospects. *Industrial Crops and Products*, 188(PA), 115608. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115608>
- Chen, L., Tu, Z., Chen, Y., Hu, J., Wang, H. (2024). Bioenergy and value-added chemicals of banana peel waste (BPW): Deeper insights from thermal kinetics, thermodynamics, in-situ volatile products analysis, and bio-chars application for Cd(II) highly-efficient removal. *Biomass and Bioenergy*, 185(December 2023), 107238. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.1072>
- Di Pietro, S. (2017). Acuerdo de París. *Cooperativismo Desarrollo*, 25(111), 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.cooperativismo.2017.11.001>

- Farouk, N., Abed, A. M., Khalil, S. A., Abdullaev, S., Alhomayani, F. M., Khan, M. N., Bayhan, Z., Knani, S., Afzal, A. R. (2025). Optimizing waste-to-energy conversion of banana peel biomass-based scheme using metaheuristic particle swarm optimization (PSO) algorithm. *Energy*, 327(November 2024), 136427. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.136427>
- Garcia, J.A., Varón, D., Barrera, J. . (2019). Convirtiendo una planta de beneficio en una biorrefinería: paso de tecnologías por el valle de la muerte. *Sustainability (Switzerland)*, 11(1), 1–14. <http://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/1091/RED2017-Eng-8ene.pdf?sequence=1>
- Gómez, J. A., Nobre, C., Teixeira, J. A., Sánchez, Ó. J. (2022). Towards a biorefinery processing waste from plantain agro-industry: Assessment of the production of dairy cattle feed through process simulation. *Biosystems Engineering*, 217, 131–149. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.103124>
- Guerrero, A. B., Ballesteros, I., Ballesteros, M. (2018). The potential of agricultural banana waste for bioethanol production. *Fuel*, 213(October 2017), 176–185. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.10.085>
- Güleç, F., Sudibyo, H., Kostas, E. T., Williams, O., Samson, A., Meredith, W., Lester, E. (2023). A comprehensive analysis on the synthesis of value-added chemicals via slow pyrolysis: Valorisation of rapeseed residue, whitewood, and seaweed (*Laminaria digitata*). *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 173(June), 106093. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2023.106093>
- Henao, J., Osorio, M., Arroyabe, R., Osorio, Y., Álvarez, M. (2021). Perfil de Desarrollo Subregional Subregión Urabá de Antioquia. Universidad de Antioquia, Facultad de Ciencias Económicas, 1–44. <https://ctpantioquia.co/wp-content/uploads/2021/09/Perfil-de-desarrollo-Urabá.pdf>
- Ighalo, J. O., Adeniyi, A. G. (2019). Thermodynamic modelling and temperature sensitivity analysis of banana (*Musa spp.*) waste pyrolysis. *SN Applied Sciences*, 1(9), 1–9. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1147-3>
- Jayanthi, B., Vinoth, S., Hariharan, M., Raja, R. K., Kamaraj, C., Narayanan, M. (2024). Valorization of agro-industry wastes for nanocellulose fabrication and its multifunctional applications. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 57(January), 103124. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2024.103124>
- Joshi, N. C., Sinha, S., Bhatnagar, P., Nath, Y., Negi, B., Kumar, V., Gururani, P. (2024). A concise review on waste biomass valorization through thermochemical conversion. *Current Research in Microbial Sciences*, 6(April), 100237. <https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2024.100237>
- Kumari, S., Debbarma, R., Habibi, M., Haque, S., Suprasana, P. (2025). Banana waste valorisation and the development of biodegradable biofilms. *Waste Management Bulletin*, 3(3), 100213. <https://doi.org/10.1016/j.wmb.2025.100213>
- Méndez-Alva, J. A., Perez-Cisneros, E. S., Rodriguez-Gomez, D., Prado-Rubio, O. A., Ruiz-Camacho, B., Morales-Rodriguez, R. (2018). Computer-aided process simulation, design and analysis: lactic acid production from lignocellulosic residues. In *Computer Aided Chemical Engineering (Vol. 44)*. Elsevier Masson SAS. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64241-7.50072-0>
- Méndez-Durazno, C., Robles Carrillo, N. M., Ramírez, V., Chico-Proano, A., Debut, A., Espinoza-Montero, P. J. (2024). Bioenergy potential from Ecuadorian lignocellulosic biomass: Physicochemical characterization, thermal analysis and pyrolysis kinetics. *Biomass and Bioenergy*, 190(September). <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107381>
- Mendonça, I. F., do Vale, G. S., Evaristo, R. B. W., Dutra, R. C., Paulo de Oliveira Rodrigues, P., Silveira, E. A., Ghesti, G. (2025). Optimizing torrefaction of banana waste (peels

and rachis) for sustainable biocoal production in rural communities. *Biomass and Bioenergy*, 196(February). <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.107726>

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Cadena De Banano Dirección de Cadenas Agrícolas y Forestales. (2021). Mo, W., Xiong, Z., Leong, H., Gong, X., Jiang, L., Xu, J., Su, S., Hu, S., Wang, Y., Xiang, J. (2022). Processes simulation and environmental evaluation of biofuel production via Co-pyrolysis of tropical agricultural waste. *Energy*, 242, 123016. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.123016>

Mohamad, N. A. N., Jai, J. (2022). Response surface methodology for optimization of cellulose extraction from banana stem using NaOH-EDTA for pulp and papermaking. *Heliyon*, 8(3). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09114>

Moreda, G. A., Tolasa, S. D., Teklemariyem, D. A. (2024). Modeling and simulation of Khat waste fast pyrolysis for energy recovery. *Heliyon*, 10(2), e24176. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24176>

Objetivos de Desarrollo Sostenible - Secretaría Seccional de Salud y Protección Social de Antioquia. (2023). <https://dssa.gov.co/index.php/ods>

Ortiz-Sanchez, M., Cardona Alzate, C. A. (2024). Biorefinery approaches for a comprehensive recovery of retail organic food waste: Sustainability analysis of different configurations. *Bioresource Technology Reports*, 25(August 2023), 101778. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2024.101778>

Ortiz-Sanchez, M., Solarte-Toro, J. C., Alzate, C. A. C. (2023). Food waste valorization applying the biorefinery concept in the Colombian context: Pre-feasibility analysis of the organic kitchen food waste processing. *Biochemical Engineering Journal*, 194(February), 108864. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2023.108864>

Pardo, R., Taboada-Ruiz, L., Fuente, E., Ruiz, B., Díaz-Somoano, M., Calvo, L. F., Paniagua, S. (2023). Exploring the potential of conventional and flash pyrolysis methods for the valorisation of grape seed and chestnut shell biomass from agri-food industry waste. *Biomass and Bioenergy*, 177(April), 106942. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2023.106942>

Patel, A., Desai, S. S., Mariam, I., Enman, J., Rova, U., Christakopoulos, P., Matsakas, L. (2024). Innovative biorefinery approaches for upcycling of post-consumer food waste in a circular bioeconomy context. *Chemical Engineering Journal*, 494(June), 152990. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.152990>

Patil, H., Naik, R., Paramasivam, S. K. (2024). Utilization of banana crop ligno-cellulosic waste for sustainable development of biomaterials and nanocomposites. *International Journal of Biological Macromolecules*, 282(P3), 137065. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.137065>

Premchand, P., Demichelis, F., Chiaramonti, D., Bensaid, S., Fino, D. (2023). Biochar production from slow pyrolysis of biomass under CO₂ atmosphere: A review on the effect of CO₂ medium on biochar production, characterisation, and environmental applications. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(3), 110009. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110009>

Priyadarsini, A., Swain, B., Mishra, A., Nanda, S., Dash, M., Swain, N., Jena, P. K., Mohanty, M. K. (2023). Study on biofuel efficiency of tropical banana leaf biomass using spectroscopy, kinetic and thermodynamic parameters. *Bioresource Technology Reports*, 23(May), 101522. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2023.101522>

Ramirez Malule, H. D., Ordoñez-Losada, L., Gómez- Ríos, D. (2024). Análisis bibliométrico de tecnologías para la valorización de residuos sólidos urbanos y su potencial en el contexto colombiano. *Ingeniería y Competitividad*, 26(2). <https://doi.org/10.25100/iyv.v26i2.13225>

Redondo-g, C., Rodr, M., Vallejo, S. (2020). Biorefinery of Biomass of Agro-Industrial Banana. *Molecules Review*, 1–13.

- Requejo, A., Santos, N. (n.d.). La Biorrefinería: caminando hacia un desarrollo sostenible.
- Saini, R., M Mahajani, S., Deb Barma, S., Srinivas Rao, D. (2024). Valorization of coconut and banana wastes with petcoke and coal via steam gasification in a fluidized bed reactor. *Journal of Cleaner Production*, 434(December 2023), 139955. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139955>.
- Sakheta, A., Nayak, R., O'Hara, I., Ramirez, J. (2023). A review on modelling of thermochemical processing of biomass for biofuels and prospects of artificial intelligence-enhanced approaches. *Bioresource Technology*, 386(July), 129490. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129490>.
- Salcedo-Puerto, O., Mendoza-Martinez, C., Vakkilainen, E. (2025). Colombian agroindustrial crop residues: Thermochemical characterization and evaluation of their energy potential. *Energy Reports*, 13(November 2024), 1802–1816. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2025.01.041>.
- Sanoja-López, K. A., Guamán-Marquines, C. W., Luque, R. (2024). Advanced processes in biomass/waste valorization: A review. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 41(February), 101704. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2024.101704>.
- Sawarkar, A. N., Kirti, N., Tagade, A., Tekade, S. P. (2022). Bioethanol from various types of banana waste: A review. *Bioresource Technology Reports*, 18(May), 101092. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2022.101092>.
- Volpato Maroldi, W., de Andrade Arruda Fernandes, I., Demczuk Junior, B., Cristina Pedro, A., Maria Maciel, G., Windson Isidoro Haminiuk, C. (2024). Waste from the food industry: Innovations in biorefineries for sustainable use of resources and generation of value. *Bioresource Technology*, 413(September). <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.131447>.
- Vuppaladadiyam, A. K., Varsha Vuppaladadiyam, S. S., Sikarwar, V. S., Ahmad, E., Pant, K. K., S. M., Pandey, A., Bhattacharya, S., Sarmah, A., Leu, S. Y. (2023). A critical review on biomass pyrolysis: Reaction mechanisms, process modeling and potential challenges. *Journal of the Energy Institute*, 108(January), 101236. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2023.101236>.
- Zaini, H. M., Saallah, S., Roslan, J., Sulaiman, N. S., Munsu, E., Wahab, N. A., Pindi, W. (2023). Banana biomass waste: A prospective nanocellulose source and its potential application in food industry – A review. *Heliyon*, 9(8), e18734. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18734>.

Avances Proyectos de Investigación

Esta sección presenta los avances de los proyectos de investigación desarrollados por los grupos GIS y GHYGAM, como parte de su compromiso con la consolidación de una producción científica de impacto en las áreas de la ingeniería, la innovación y la tecnología. Los trabajos evidencian el progreso alcanzado en distintas líneas de investigación, reflejando la pertinencia de las problemáticas abordadas.

Los resultados que se presentan permiten visibilizar el estado actual de las investigaciones y abren espacios de diálogo y retroalimentación académica, fundamentales para fortalecer la calidad de los proyectos y su contribución al desarrollo científico, social y productivo de la región y del país.

Desarrollo de Morteros Estructurales a partir de Mezclas de Cemento y Cenizas Volante

Harveth Gil¹, Julián Andrés Lenis Rodas¹, Esteban Piedrahita González¹,
Steven Yarce Rendón¹,

Resumen

En este estudio se analizó las propiedades fisicoquímicas, morfología y resistencia a la compresión de muestras de mortero estructural con reemplazo parcial de cemento Portland Tipo I por ceniza volante (CV) de baja concentración de calcio en niveles del 0, 5, 10, 15 y 20 % en peso. Se caracterizaron inicialmente las propiedades físicas de los agregados finos, el cemento y la CV conforme a normas técnicas colombianas (NTC). Además, se examinó la morfología y composición elemental del material cementante mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), espectroscopía de dispersión de energía (EDS) y fluorescencia de rayos X (XRF). Las muestras de mortero fueron evaluadas a los 3, 7 y 28 días de curado. La resistencia a la compresión a los 28 días alcanzó valores satisfactorios para todas las mezclas. Se observaron reducciones de 1.8 % y 2.3 % para los contenidos de 5, y 20 % de CV, mientras que para 10 y 15 % superaron el diseño base. Dado que todas las mezclas evaluadas superaron la resistencia de diseño, incluida la mezcla con 20 % de CV, se concluye que la sustitución parcial de cemento con CV es una estrategia viable y eficaz para aplicaciones en morteros estructurales.

Abstract

This study analyzed the physicochemical properties, morphology, and compressive strength of structural mortar samples with partial replacement of Type I Portland cement with low-calcium fly ash (FA) at levels of 0, 5, 10, 15, and 20 % by weight. The physical properties of the fine aggregates, cement, and FA were initially characterized following Colombian technical standards (NTC). In addition, the morphology and elemental composition of the cementitious material were examined using scanning electron microscopy (SEM), energy-dispersive spectroscopy (EDS), and X-ray fluorescence (XRF). Mortar samples were evaluated at 3, 7, and 28 days of curing. At 28 days, the compressive strength reached satisfactory values for all mixtures. Reductions of 1.8 % and 2.3 % were observed for the contents of 5 % and 20 % FA, respectively, while the contents of 10 % and 15 % exceeded the base design. Since all the tested mixtures exceeded the strength of the design, including the mix with 20 % FA, it is concluded that the partial replacement of cement with FA is a viable and effective strategy for use in structural mortar applications.

Palabras clave: fly ash, SEM, mortar, sustainable material, pozzolanic material

¹ steven_yarce01162@elpoli.edu.co - Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid-Grupo de Investigación en Ingeniería Sostenible-GIS

1. Introducción

El cambio climático representa uno de los mayores retos globales, debido a sus impactos sobre el nivel del mar, la acidificación de los océanos y la contaminación de recursos esenciales como el agua dulce y los suelos. Este fenómeno está asociado principalmente a la acumulación de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, de los cuales el sector de la construcción representa una fuente significativa, responsable del 37 % de las emisiones mundiales de dióxido de carbono (CO₂) en 2020 ([Adesina, 2020](#)). Dentro de este sector, la producción de cemento Portland genera entre el 5 y el 7 % de las emisiones antropogénicas globales de CO₂ ([Aprianti, Shafigh, Bahri, y Farahani, 2015](#); [Bogas, Carriço, y Pereira, 2019](#); [Ohemeng y Naghizadeh, 2023](#)).

El mortero es un material compuesto por cemento, agua y agregados finos, y en ocasiones aditivos químicos o minerales, empleado ampliamente como material de unión. La producción de cemento Portland genera entre 0.66 y 0.82 kg de CO por cada kilogramo producido ([Aprianti et al., 2015](#); [Pérez et al., 2024](#)), y los agregados finos entre 0.0025 y 0.0050 kg de CO por kilogramo ([Adesina, 2020](#)). La sustitución parcial de estos materiales por alternativas con menor huella ambiental como la ceniza volante (CV) puede representar beneficios económicos y ecológicos significativos.

La CV es un subproducto de la combustión de carbón en termoeléctricas. Su composición rica en SiO y AlO, junto con su fase vítrea reactiva, permite reacciones puzolánicas que generan compuestos cementantes. Estudios previos han demostrado su viabilidad como sustituto parcial del cemento ([Jaturapitakkul y Cheerarot, 2003](#); [Armada Bras y Faustino, 2016](#)). Sin embargo, la falta de experiencia industrial y evidencia científica ha limitado su aplicación generalizada. Este estudio evalúa el impacto de sustituir entre 0 y 20 % de cemento con CV sobre las propiedades físicas, químicas y mecánicas del mortero, incluyendo resistencia a compresión, módulo dinámico y análisis microscópico mediante SEM, EDS y XRF.

2. Métodos y materiales

Se utilizaron agregados finos provenientes de la cantera Santa Rita (Medellín), caracterizados según normas NTC. El cemento Portland Tipo I y la CV se evaluaron mediante SEM, EDS y XRF. La caracterización morfológica y mineralógica del cemento y la ceniza volante (CV) se realizó mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) acoplada a espectroscopía de dispersión de energía (EDS), utilizando un microscopio electrónico de barrido JEOL JSM-6490LV.

La composición química de la CV y del cemento se analizó mediante fluorescencia de rayos X (XRF) con un equipo ARL 9800 XP ARL. Se diseñaron mezclas tipo M según la NSR-10 con una relación cemento:arena de 1:2.5 y agua:cemento de 0.58. Se prepararon especímenes con 0, 5, 10, 15 y 20 % de sustitución de cemento por CV. El flujo se midió con mesa de sacudidas (ASTM 230), y la resistencia a la compresión se determinó a los 3, 7 y 28 días de curado usando un equipo AUTOMAX5 CONTROLS siguiendo la norma ASTM C10.

Las mediciones de la velocidad de pulso ultrasónico (UPV) se realizaron utilizando un equipo CONTROLS E48, siguiendo la norma NTC 4325. Se tomaron tres mediciones de UPV

en cada par de caras paralelas para cada condición de mortero. Se calculó el tiempo promedio que tarda el pulso en recorrer la muestra desde el emisor hasta el receptor. La velocidad de pulso ultrasónico (UPV) se midió para estimar calidad y módulo elástico dinámico.

Material	Porcentaje del cementante (%)				
	0	5	10	15	20
CV	0	5	10	15	20
Cemento	100	95	90	85	80

Tabla 1: Proporciones de material cementante para el diseño de mezcla de mortero.

3. Resultados y discusión

El módulo de finura de la arena (3.3) confirma su carácter grueso. La distribución granulométrica muestra una curva en forma de 'S' típica de materiales bien graduados. La CV presentó menor densidad específica (2.7 g/cm^3) que el cemento (3.15 g/cm^3), debido a la presencia de esferas huecas. En la Tabla 2 se encuentran los resultados de las características físicas de los agregados finos y su distribución granulométrica (Fig. 1.).

Característica	Valor
Tamaño (mm)	4.75
Materia orgánica	Color Gardner No.5, placa orgánica No.1
Partículas finas $<75\mu\text{m}$ (%)	10.84
Gravedad específica (g/cm^3)	2.7
Contenido de humedad (%)	1.7
Absorción (%)	1.071
Módulo de finura	3.3

Tabla 2: Características físicas de los agregados finos utilizados en los compuestos .

La Tabla 3 muestra el análisis por fluorescencia de rayos X (XRF) realizado al cemento y a la ceniza volante (CV). Los resultados indican que los principales compuestos presentes en la CV son SiO_2 , Al_2O_3 , FeO y CaO . La CV puede clasificarse como Clase F debido a su bajo contenido de CaO ($<8\%$) ([Jayaranjan, Van Hullebusch, y Annachhatre, 2014](#)). La norma ASTM C 618-95 establece que una CV de Clase F debe tener un contenido mínimo del 70 % en la suma de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$ y un contenido máximo de 5 % de SO_2 . La CV utilizada en este estudio cumple con ambas condiciones. El contenido de SO_2 fue inferior al 1 %, lo que garantiza la prevención de pérdidas de resistencia y del fenómeno de expansión.

En la Figura 2 presenta las imágenes SEM del material cementante. La ceniza volante (CV) muestra partículas esféricas e irregulares de tamaños variables, que van desde menos de 1 μm hasta más de 20 μm . Las partículas presentan esferas sólidas, estructuras huecas tipo cenósferas y partículas de carbono no quemado con formas irregulares, comúnmente presentes en muestras de CV Clase F provenientes de plantas termoeléctricas ([Kutchko y Kim, 2006](#)).

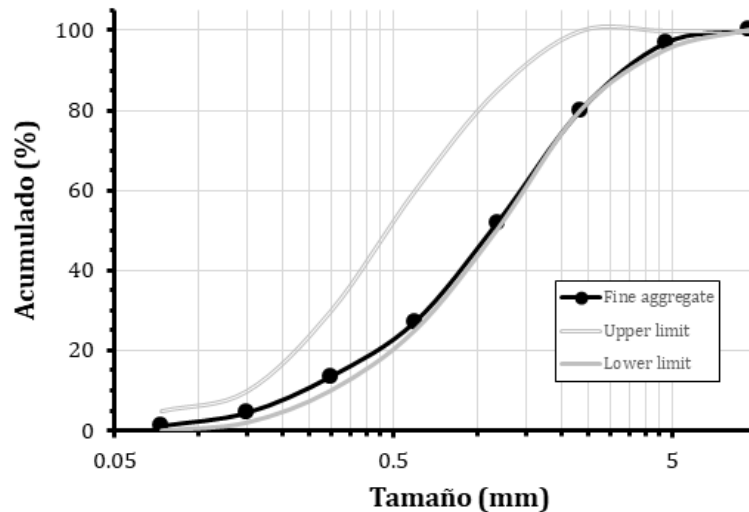


Figura 1: Distribución granulométrica del agregado fino.

Material	Composición (wt %)					
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	SO ₃
Cementante						
Cemento	56.58	21.46	8.56	5.15	3.94	2.90
CV	3.95	43.32	35.43	1.34	5.17	0.882

Tabla 3: Composición elemental del cemento y la CV obtenida mediante XRF.

El análisis elemental revela que la CV está compuesta principalmente por aluminosilicatos y una menor proporción de óxidos de hierro.

La Tabla 4 resume los valores promedio de la velocidad de pulso ultrasónico (UPV), el módulo dinámico de elasticidad y la densidad de las mezclas de mortero. Según los valores de UPV, las mezclas de mortero clasificadas como de buena calidad se encuentran en el rango de 3500 m/s a 4500 m/s, mientras que las mezclas en el rango de 3000 m/s a 3500 m/s se consideran de calidad cuestionable (Nugroho et al., 2022; Mohana, 2020; Mendes et al., 2020). La UPV disminuye a medida que aumenta el contenido de ceniza volante (CV), lo cual podría deberse a vacíos o discontinuidades generadas por un mayor grado de sustitución del cemento, lo que se atribuye a la menor densidad seca del mortero con CV (Srivastava, Singh, y Sharma, 2021). Los valores de UPV a los 28 días mostraron una disminución del 0, 10, 15 y 20 como de buena calidad. La UPV incrementó con el tiempo de curado, en correspondencia con la formación progresiva de productos de hidratación.

El módulo dinámico de elasticidad también mostró incrementos con el tiempo de curado. Sin embargo, los valores a 28 días para mezclas modificadas con CV fueron entre un 1 y un 5 % menores respecto al mortero de referencia. Las densidades también disminuyeron con mayor contenido de CV. La mayor reducción de densidad se observó en la mezcla con 15 % de CV, con una disminución del 2.3 %. Esta reducción está asociada a la menor densidad de la CV y

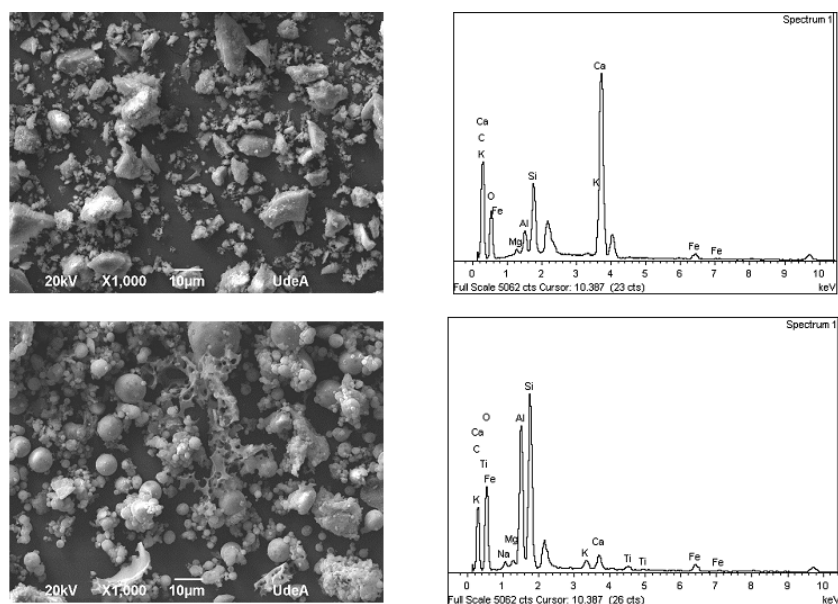


Figura 2: Imágenes morfológicas y composición elemental del material cementante: a) cemento; b) CV.

su mayor absorción de agua.

La Figura 3 muestra la variación de la resistencia a la compresión de los morteros a lo largo del tiempo de curado, reflejando un aumento de la resistencia a medida que avanza la edad para cada porcentaje de ceniza volante (CV). Las muestras con 10 y 15 % de CV presentan una mayor resistencia que la muestra de referencia. Este comportamiento es similar al observado en la prueba de UPV, donde las muestras con los mismos porcentajes de CV alcanzan los valores más altos de velocidad de pulso. Se observa un incremento rápido de la resistencia en los primeros días de curado para las muestras con bajo contenido de CV. Con el tiempo, la reacción puzolánica de la CV continúa desarrollándose, lo que resulta en valores de resistencia más altos (Moon, Oh, y Choi, 2016). No se detectaron diferencias significativas entre el mortero sin adición y el modificado con 5 % de CV.

En la Figura 4 se presenta la resistencia a la compresión del mortero en función del contenido de CV. Los contenidos de 10 % y 15 % de ceniza volante (CV) alcanzaron la mayor resistencia a la compresión a los 28 días de curado. Esto puede explicarse por varias razones relacionadas con el comportamiento puzolánico de la CV y su interacción con el cemento. A los 28 días, la reacción entre la CV (rica en SiO y AlO) y el hidróxido de calcio (Ca(OH)) liberado durante la hidratación del cemento está más avanzada y la CV actúa también como un relleno fino, mejorando la compactación de la matriz cementante. En cambio, a niveles mayores como el 20 %, la reducción del contenido de cemento activo puede superar los beneficios del efecto puzolánico, lo que explica por qué la resistencia disminuye ligeramente en ese caso.

El análisis SEM revela una reducción progresiva en la porosidad de la matriz del mortero conforme avanza el curado. A los 3 días, la microestructura presenta vacíos y productos de

Tiempo (d)	CV (%)	UPV (m/s)	E (GPa)	(kg/m ³)
3	0	3352.77 ± 67	22.24 ± 1	2259.26 ± 44
	5	3389.98 ± 136	22.53 ± 2	2235.27 ± 15
	10	3428.29 ± 61	23.12 ± 1	2245.83 ± 8
	15	2826.99 ± 76	15.26 ± 1	2178.05 ± 26
	20	2829.13 ± 157	15.45 ± 2	2199.15 ± 8
7	0	3690.21 ± 92	26.80 ± 1	2245.55 ± 22
	5	3371.62 ± 111	22.21 ± 1	2229.16 ± 10
	10	3362.84 ± 37	22.19 ± 1	2240.01 ± 14
	15	3094.23 ± 38	18.57 ± 0	2214.24 ± 11
	20	2824.83 ± 141	15.45 ± 1	2208.06 ± 12
28	0	3622.69 ± 65	25.69 ± 1	2234.44 ± 16
	5	3751.40 ± 111	27.56 ± 1	2235.16 ± 26
	10	3902.63 ± 56	29.64 ± 1	2221.60 ± 21
	15	3898.77 ± 24	29.47 ± 1	2213.04 ± 20
	20	3778.09 ± 66	27.86 ± 1	2227.81 ± 16

Tabla 4: Velocidad de pulso ultrasónico (UPV), módulo elástico dinámico y densidad para morteros modificados con CV en varios tiempos de curad.

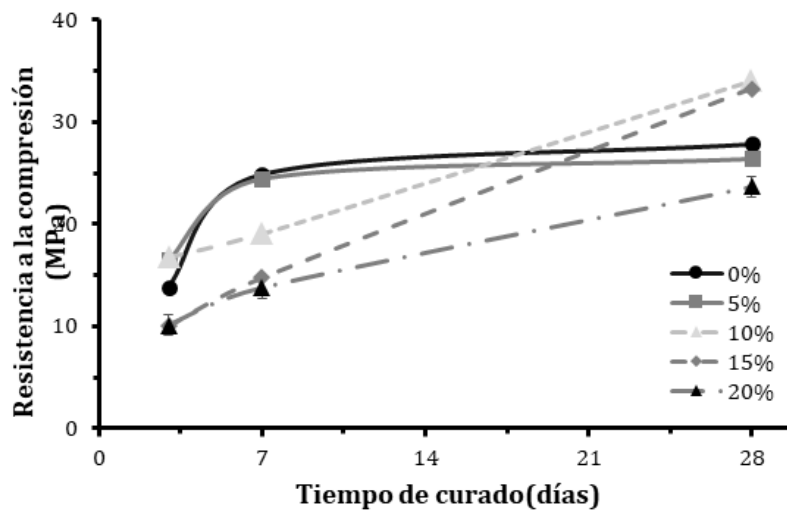


Figura 3: Resistencia a la compresión del mortero en función del tiempo de curado para diferentes contenidos de CV.

hidratación en estado inicial. A los 7 días, se observan estructuras cristalinas típicas de etringita y una mayor formación de C-S-H. Finalmente, a los 28 días, las imágenes muestran una matriz

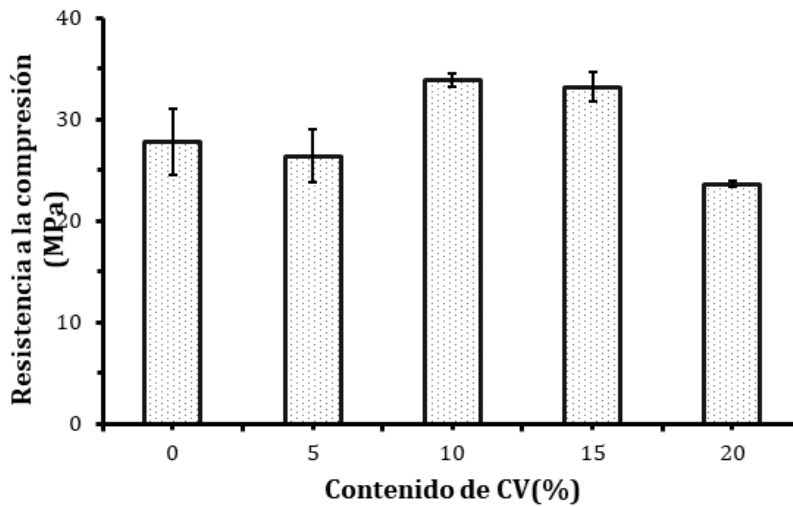


Figura 4: Resistencia a la compresión del mortero en función del contenido de CV.

más compacta, con desarrollo avanzado de geles C-S-H y depósitos masivos de portlandita. Este comportamiento es más notorio en mezclas con 10 y 15 % de CV, donde se logra una estructura homogénea sin defectos críticos evidentes.

4. Conclusiones

- Este estudio demostró que la ceniza volante (CV) puede utilizarse como sustituto parcial del cemento en la producción de morteros estructurales, cumpliendo con las exigencias normativas colombianas. La CV clase F utilizada presentó alta actividad puzolánica, evidenciada por la formación de geles C-S-H y C-A-H tras reaccionar con Ca(OH) del cemento.
- A los 28 días de curado, la resistencia a la compresión presentó valores satisfactorios en todas las mezclas analizadas. Las mezclas con 5 % y 20 % de ceniza volante (CV) registraron reducciones del 1.8 % y 2.3 %, respectivamente, en comparación con el diseño base, mientras que las formulaciones con 10 % y 15 % de CV superaron dicha referencia.
- Todos los morteros evaluados superaron la resistencia mínima de diseño (17.2 MPa), lo que confirma la viabilidad técnica del uso de CV como material cementante suplementario. Esta estrategia puede contribuir significativamente a la reducción del impacto ambiental de la industria de la construcción.

Referencias

Adesina, A. (2020). Recent advances in the concrete industry to reduce its carbon dioxide emissions. *Environmental Challenges*, 1, 100004.

- Aprianti, E., Shafigh, P., Bahri, S., y Farahani, J. N. (2015). Supplementary cementitious materials origin from agricultural wastes—a review. *Construction and Building Materials*, 74, 176–187.
- Armada Bras, A., y Faustino, P. (2016). Repair mortars and new concretes with coal bottom and biomass ashes using rheological optimisation. *International Journal of Environmental Research*, 10(2), 203–216.
- Bogas, J., Carriço, A., y Pereira, M. (2019). Mechanical characterization of thermal activated low-carbon recycled cement mortars. *Journal of Cleaner Production*, 218, 377–389.
- Jaturapitakkul, C., y Cheerarot, R. (2003). Development of bottom ash as pozzolanic material. *Journal of materials in civil engineering*, 15(1), 48–53.
- Jayaranjan, M. L. D., Van Hullebusch, E. D., y Annachhatre, A. P. (2014). Reuse options for coal fired power plant bottom ash and fly ash. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 13(4), 467–486.
- Kutchko, B. G., y Kim, A. G. (2006). Fly ash characterization by sem-eds. *Fuel*, 85(17-18), 2537–2544.
- Mendes, S. E., Oliveira, R. L., Cremonez, C., Pereira, E., Pereira, E., y Medeiros-Junior, R. A. (2020). Mixture design of concrete using ultrasonic pulse velocity. *International Journal of Civil Engineering*, 18(1), 113–122.
- Mohana, M. H. (2020). Assessment of concrete compressive strength by ultrasonic pulse velocity test. *Iraqi Journal of Civil Engineering*, 14(1), 39–46.
- Moon, G. D., Oh, S., y Choi, Y. C. (2016). Effects of the physicochemical properties of fly ash on the compressive strength of high-volume fly ash mortar. *Construction and Building Materials*, 124, 1072–1080.
- Nugroho, M. S., Ma'arif, F., Widodo, S., Rachmi, D., Fajriani, Q., Suryadwanti, N., . . . others (2022). The effect of mortar mixture variations on the compressive strength and ultrasonic pulse velocity. *INERSIA Lnformasi Dan Ekspose Hasil Riset Teknik Sipil Dan Arsitektur*, 18(2), 225–234.
- Ohemeng, E. A., y Naghizadeh, A. (2023). Alternative cleaner production of masonry mortar from fly ash and waste concrete powder. *Construction and Building Materials*, 374, 130859.
- Pérez, O. F. A., Arrieta, V. S., Ospina, J. H. G., Herrera, S. H., Rojas, C. F. R., y Navarro, A. M. S. (2024). Carbon dioxide emissions from traditional and modified concrete. a review. *Environmental Development*, 52, 101036.
- Srivastava, A., Singh, S., y Sharma, C. S. (2021). Correlation between ultrasonic pulse velocity (upv) and compressive strength of coal bottom ash mortar. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*, 102(2), 421–433.

Uso del metaverso como estrategia de aprendizaje experiencial en estudiantes universitarios

Claudia Alejandra Rosero Noguera¹, Enoc Valentín González Palacio², Luis Fernando González Alvarán³,

Resumen

Las tecnologías inmersivas han avanzado significativamente en los últimos años, usándose en diferentes ámbitos y no ha sido indiferente en educación. Es que estos avances ofrecen experiencias, oportunidades y retos para implementar con todos los actores que intervienen en la formación de estudiantes. Específicamente el metaverso facilita a los profesores usarlo como una estrategia de aprendizaje experiencial, ya que simula escenarios reales de todo tipo y al estudiante se le facilita el desarrollo de competencias, pero no se conoce realmente su efecto, por ende el objeto de este estudio es evaluar el efecto del metaverso en las estrategias de aprendizaje mediante una intervención con un grupo experimental y un grupo control, ambos abordando los mismos contenidos académicos pero bajo metodologías diferentes. Los resultados preliminares demuestran que el metaverso aplicado en formación universitaria es una herramienta que transforma la manera de enseñar y aprender, ya que permite experiencias inmersivas, prácticas, en donde puedes recibir colaboración desde cualquier parte del mundo, fortalece competencias específicas como transversales.

Palabras Clave Metaverso, Estrategia de Aprendizaje, Aprendizaje Experiencial

Abstract

Immersive technologies have advanced significantly in recent years, being used in various fields, and education has been no exception. These advancements offer experiences, opportunities, and challenges for implementation involving all actors in the student learning process. Specifically, the metaverse enables teachers to use it as a strategy for experiential learning, as it simulates all kinds of real-life scenarios and facilitates the development of competencies for students. However, its actual effect is not yet fully understood. Therefore, the aim of this study is to evaluate the effect of the metaverse on learning strategies through an intervention with an experimental group and a control group, both addressing the same academic content but using different methodologies. Preliminary results show that the metaverse, when applied in higher education, is a tool that transforms the way teaching and learning occur. It enables immersive, hands-on experiences, fosters collaboration from anywhere in the world, and strengthens both specific and transversal competencies.

keywords Metaverse, Learning Strategy, Experiential Learning

¹ carosero@elpoli.edu.co - Universidad de San Buenaventura, Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid

² enoc.gonzalez@udea.edu.co - Universidad de Antioquia

³ lfgonzaleza@elpoli.edu.co - Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid

1. Introducción

El uso de tecnologías inmersivas como la Realidad Virtual, Realidad Aumentada y el Metaverso se ha convertido en el reto para el ámbito educativo y en los últimos años se ha incrementado su implementación; es que en la era digital estos avances han evolucionado significativamente y por ende no puede ser indiferente en los procesos formativos; por lo cual los maestros deben estar a la vanguardia de estos cambios y utilizarlos como una estrategia de enseñanza aprendizaje. Al respecto [Freiberg-Hoffmann et al., \(2022\)](#) plantean que, con “la introducción de herramientas tecnológicas, los profesores pueden captar de manera más sencilla las diferencias individuales de sus estudiantes en cuanto a preferencias para incorporar información novedosa, adecuando sus acciones didácticas” (p. 14).

Con respecto a las estrategias de aprendizaje, también han cambiado sustancialmente sobre todo en los últimos años en donde la influencia de los avances tecnológicos se ha marcado de forma significativa, [Chiruguru y Chiruguru \(2020\)](#) plantean que “en el siglo XXI, la ciudadanía exige niveles de alfabetización informacional y tecnológica que van mucho más allá de los conocimientos básicos que bastaban en el pasado” (p. 2).

Es importante destacar que el estudiante se convierte en el eje central del proceso formativo por ende cada estrategia de aprendizaje debe estar enfocada en potenciar sus diferentes habilidades. Por ende, las estrategias de aprendizaje y el aprendizaje experiencial forman una alianza que permite a los estudiantes aprender en un aula divertida y adquieren conocimiento de forma entretenida y al mismo tiempo manteniendo la motivación. Por lo que, “estudios confirman los efectos positivos que tienen sobre la motivación el uso de estrategias de gamificación y cómo las acciones formativas basadas en juegos facilitan el desarrollo de competencias” ([Fernández-Sánchez et al., 2020](#)).

Por su parte, el metaverso no es algo nuevo, sin embargo, en el ámbito educativo en los últimos años ha tomado relevancia. Por ende, surgió el interés de conocer el efecto del metaverso en las estrategias de aprendizaje. Entre ellas el aprendizaje experiencial en los estudiantes universitarios ya que por medio de esta tecnología se puede simular virtualmente escenarios que en el mundo real serían inaccesibles, Por ejemplo, conocer el funcionamiento de un aeropuerto o manipular elementos radioactivos sin causarse daño, visualizar el funcionamiento del corazón, conocer sus partes y tener una experiencia sensorial significativa para su aprendizaje.

2. Métodos y materiales

La práctica pedagógica consistió en la implementación de ambientes inmersivos diseñados en la plataforma Spatial.io, esta permite crear entornos en un espacio virtual 3D en la cual los usuarios pueden interactuar a través de dispositivos de escritorio, teléfonos móviles o gafas de realidad virtual. Ofreciendo funciones de colaboración y proporciona una experiencia de aprendizaje inmersiva. ([Hidayati et al., 2024](#)).

En los ambientes inmersivos creados bajo la plataforma Spatial.io, se les permite a los estudiantes tener una experiencia inmersiva en varios mundos virtuales. Lo anterior se realizó con el propósito de conocer el efecto del metaverso como estrategia de aprendizaje.

El estudio tuvo un grupo experimental y un grupo de control en ellos la asignación no fue

al azar, pues se trató de grupos de estudiantes universitarios de primer semestre de la Facultad de Ingeniería del programa Técnica Profesional en Programación de Sistemas de Información del Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid.

Para tal fin se definieron previamente unas temáticas específicas para aplicar a los dos grupos. El grupo experimental recibió clases con gamificación y metaverso y el grupo control clases de forma tradicional, cabe aclarar que el universo del discurso para los ejercicios y actividades para los dos grupos fue el mismo.

Para obtener resultados se aplicó el instrumento CEVEAPEU que es un cuestionario para la evaluación de las estrategias de aprendizaje de los estudiantes universitarios. (Gargallo et al., 2009, p. 1). Este instrumento es de origen español y ya se encuentra validado, pero para esta investigación se requirió ejecutar su validación en el ámbito colombiano.

En la práctica los escenarios se diseñaron para estudiantes universitarios, en temáticas específicas del módulo asignatura Identificación del Ciclo de Vida del Software como la interpretación de requerimientos, roles en el desarrollo de software e introducción a elaboración de mapas de navegación. A continuación, se detalla el proceso completo, pero se aclara que en este documento se presentarán resultados preliminares de la intervención:

2.1. Fase de Diseño y Planificación

■ Actividades del docente:

- Diseño de mundos virtuales en la plataforma Spatial.io, cada uno enfocado en temas específicos del módulo Identificación del Ciclo de Vida del Software.
- Creación de materiales didácticos adaptados al entorno virtual.
- Desarrollo de actividades de gamificación integradas a los contenidos académicos.
- Establecimiento de objetivos de aprendizaje claros y medibles.
- Selección de grupos experimental y control dentro del programa Técnica Profesional en Programación de Sistemas de Información, de primer semestre.
- Validación del instrumento CEVEAPEU con 460 estudiantes universitarios.

■ Actividades de los estudiantes:

- Familiarización con el ambiente inmersivo.
- Pruebas iniciales con el uso de gafas Oculus y plataforma Spatial.
- Responder el cuestionario CEVEAPEU como diagnóstico inicial.

2.2. Fase de Implementación

■ Actividades del docente:

- Introducción en el escenario inmersivo con las gafas al grupo experimental.
- Orientación sobre navegación y funcionalidades básicas del escenario.
- Implementación de estrategias de gamificación (sistema de puntos, insignias, tablas de clasificación).

- Impartición de los mismos contenidos al grupo control mediante metodología tradicional.
- Monitoreo continuo de la participación y el progreso de ambos grupos.
- **Actividades de los estudiantes (grupo experimental):**
 - Creación y personalización de avatares para representarse en el metaverso.
 - Exploración activa de los mundos virtuales diseñados.
 - Participación en actividades de gamificación dentro del metaverso.
 - Resolución de problemas prácticos de interpretación de requerimientos en el escenario inmersivo.
 - Colaboración con compañeros en solución de retos.
 - Reflexión sobre las experiencias inmersivas.
- **Actividades de los estudiantes (grupo control):**
 - Asistencia a clases tradicionales sobre los mismos temas.
 - Realización de ejercicios de forma convencional.
 - Participación en discusiones grupales presenciales.

2.3. Fase de Evaluación y Seguimiento

- **Actividades del docente:**
 - Aplicación del instrumento CEVEAPEU como evaluación posterior.
 - Recopilación de datos sobre asistencia, participación y rendimiento.
 - Análisis comparativo entre el grupo experimental y el grupo control.
 - Documentación de observaciones cualitativas sobre el comportamiento de los estudiantes.
 - Evaluación de productos finales desarrollados por ambos grupos.
- **Actividades de los estudiantes:**
 - Completar el cuestionario CEVEAPEU post-implementación.
 - Presentación de actividades.
 - Participación en retroalimentación de la experiencia.
 - Autoevaluación del proceso de aprendizaje.

3. Conclusiones

El uso de escenarios inmersivos facilita la explicación de conceptos y a su vez permite dar a conocer su aplicabilidad real en cualquier área del conocimiento. Estudios en esta área afirman que “el Metaverso puede ampliar las oportunidades educativas para explorar entornos históricamente inaccesibles debido a barreras de espacio, tiempo y costo, resolviendo así problemas reales en mundos virtuales.” (Tlili et al., 2022, p. 27). Lo anterior es importante ya que facilita el logro de competencias transversales y específicas vivencialmente para que en un futuro las pueda aplicar en el sector productivo.

Por otra parte, el estudio realizado por Hwang y Chien plantean que es importante intervenir los currículos ya que estas tecnologías inmersivas aplican en cualquier profesión o área del conocimiento y “brinda a los estudiantes más oportunidades para experimentar, explorar, aprender y enseñar en un mundo nuevo, además de trabajar e interactuar con personas. Incluso pueden aprender o practicar en contextos que no pueden experimentar en el mundo real.” (Hwang y Chien, 2022, p. 3).

Con base en lo anterior, el metaverso expande un sinnúmero de posibilidades experienciales sin límites, en el cual los estudiantes pueden, identificar y experimentar situaciones, interactuar y compartir conocimiento con otras personas en cualquier lugar del mundo. Así mismo, la práctica no solo facilita el aprendizaje de contenidos disciplinares, sino que refuerza las competencias digitales avanzadas.

4. Resultados

Al inicio de la intervención el grupo control tenía 28 estudiantes y el grupo experimental contó con 26 estudiantes; se realizó la intervención a los dos grupos por un término de 30 días, 4 horas a la semana que es la intensidad horaria que le corresponde al módulo identificación del ciclo de vida del software. Con base en lo anterior preliminarmente, se evidenció en los dos grupos lo siguiente:

■ Grupo Experimental

1. Más interés, mejoró la asistencia a clase, cumplimiento de actividades: esto se evidenció con los listados de asistencia y la puntualidad en la entrega de los ejercicios propuestos
2. Motivación con respecto al aprendizaje: Interés por conocer el paso a paso y los procesos mediante los cuales se crean los escenarios inmersivos.
3. Interés por aprender e investigar: No querían finalizar la clase, siempre interesados a trabajar en equipo y socializar con sus compañeros las experiencias, mejoras y soluciones óptimas
4. Calificaciones: Se aplicaron los mismos ejercicios y actividades evaluativas a los dos grupos y de 23 estudiantes, sólo dos obtuvieron notas inferiores a 3.0

■ Grupo Control

1. Disminución de estudiantes, cumplimiento de actividades: Se evidenció por los listados de clase que los estudiantes asistían cada vez menos a clase, pero los estudiantes que asisten a clase entregan puntual los ejercicios
2. Interés por aprender e investigar: Los estudiantes no preguntan en clase y algunos estudiantes prefieren trabajar individualmente que en equipo.
3. Calificaciones: Se aplicaron los mismos ejercicios y actividades evaluativas a los dos grupos y de 19 estudiantes, dos estudiantes obtuvieron notas superiores a 4.0 y 9 estudiantes obtuvieron notas inferiores a 3.0

Es importante aclarar que esta información es intuitiva ya que se realizaron comparaciones en los dos grupos con base en la experiencia durante el proceso de la intervención. Para sacar conclusiones del estudio se debe presentar los resultados de aplicar el cuestionario CEVEAPEU pretest y postest en el grupo control y experimental y esto dará información certera y concluyente.

Sin embargo, los resultados preliminares del estudio demuestran que la incorporación del metaverso impacta directamente en los factores motivacionales, ya que la asistencia a clase fue significativa y, con base a lo evidenciado en la intervención los escenarios inmersivos al ser una tecnología nueva, los estudiantes quieren conocer más de ella y esto potencializa el interés por aprender y mejorar su proceso de aprendizaje.

Referencias

- Chiruguru, D., y Chiruguru, S. (2020). *The essential skills of 21st century classroom (4cs)*. doi: 10.13140/RG.2.2.36190.59201
- Fernández-Sánchez, M., Sierra Daza, M., y Valverde-Berrocso, J. (2020). Juegos y gamificación para el desarrollo social y comunitario. *Revista Prisma Social*(30), 141-160. Descargado de <https://revistaprismasocial.es/article/view/3746/4354>
- Freiberg-Hoffmann, A., Fernández-Liporace, M., y Uriel, F. (2022). ¿cómo aprenden los estudiantes de educación secundaria y universitaria? un análisis integral desde los estilos de aprendizaje. *Avances en Psicología Latinoamericana*, 40(3), 1-18. doi: 10.12804/revistas.urosario.edu.co/apl/a.10980
- Gargallo, B., Suárez-Rodríguez, J. M., y Pérez-Pérez, C. (2009). El cuestionario ceveapeu. un instrumento para la evaluación de las estrategias de aprendizaje de los estudiantes universitarios. *RELIEVE. Revista ELectrónica de Investigación y EValuación Educativa*, 15(2), 1-31. Descargado de <https://www.redalyc.org/pdf/916/91612906006.pdf>
- Hidayati, A., Patrama, A., Maulana, A., Primanda, D., y Hariyanto, N. (2024). Optimización de la tecnología metaverso para el aprendizaje inmersivo usando la plataforma spatial. En *Proceeding al ghazali international conference* (Vol. 1, p. 547-554). Descargado de https://www.researchgate.net/publication/389611673_OPTIMIZATION_OF_METAVERSE_TECHNOLOGY_FOR_IMMERSIVE_LEARNING_USING_THE_SPATIALIO_PLATFORM

-
- Hwang, G.-J., y Chien, S.-Y. (2022). Definition, roles, and potential research issues of the metaverse in education: An artificial intelligence perspective. *Computers and Education: Artificial Intelligence*, 3. doi: 10.1016/j.caeai.2022.100082
- Tlili, A., Huang, R., Shehata, B., Liu, D., Zhao, J., Saleh, A., y Burgos, D. (2022). Is metaverse in education a blessing or a curse: a combined content and bibliometric analysis. *Smart Learning Environments*, 9(24), 1-31. doi: 10.1186/s40561-022-00205-x

Diseño del protocolo general de fabricación de bioladrillos para su uso en mampostería no estructural

Victoria Meza-Ochoa¹, Naren Grajales-Rios², Harveth Gil-Sánchez³, Marco Antonio Márquez-Godoy⁴,

Resumen

*El presente trabajo busca establecer un protocolo para la fabricación de ladrillos de arena biocementados mediante la precipitación de carbonatos inducida por microorganismos (MICP), para su uso en mampostería no estructural. Se utilizó como materia prima una arena de sílice subproducto de la explotación de caolín, y una cepa bacteriana *Sporosarcina pasteurii* (DSMZ 323). Se definen dos fases de diseño, una fase I a nivel de Erlenmeyer para determinar variables claves del proceso y la fase II de escalado del proceso para obtener bioladrillos de 15,4 cm x 5,4 cm x 3,8 cm (largo x ancho x alto). Se midieron y analizaron parámetros de la química de la MICP en el tiempo: crecimiento celular, pH, oxígeno disuelto (OD), actividad ureasa (AU) y concentración de calcio. Se evaluó la precipitación de carbonato de calcio (CC) en la arena, mediante análisis mineralógico por difracción de rayos X (DRX) y espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), y cuantificación por reacción del CC con ácido clorhídrico (HCl). De la fase I se determinó el cloruro de calcio (CaCl_2) como la mejor fuente de calcio a una concentración 0,5 M. Se obtuvieron bioladrillos con una distribución heterogénea, y un contenido de CC entre 2,7 % y 4,5 % (interior y exterior). Se confirmó la precipitación de CC en forma de vaterita y calcita. Estos resultados aportan información importante para avanzar en el diseño de un protocolo para la fabricación de bio-ladrillos como un material de construcción alternativo y sostenible.*

Abstract

*This study aims to establish a protocol for the production of biobricks with sand-based biocemented and using microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP) for application in non-structural masonry. The raw material used was a silica sand byproduct from kaolin mining, and the bacterial strain employed was *Sporosarcina pasteurii* (DSMZ 323). Two design phases were defined: Phase I, conducted at Erlenmeyer scale to identify key process variables, and Phase II, involving process upscaling to produce biobricks measuring 15.4 cm x 5.4 cm x 3.8 cm (L x W x H). Several MICP-related chemical parameters were monitored and analyzed over time, including cell growth, pH, dissolved oxygen (DO), urease activity (UA), and calcium concentration. Calcium carbonate (CC) precipitation within the sand matrix was assessed through mineralogical analysis using X-ray diffraction (XRD) and Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), along with quantification via reaction with hydrochloric acid (HCl). Phase I results identified calcium chloride (CaCl_2) at a concentration of 0.5 M as the most effective calcium source. The resulting biobricks exhibited a heterogeneous distribution and a CC content*

¹ vemeza@elpoli.edu.co - Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid

² ngrajalesr@unal.edu.co - Universidad Nacional de Colombia

³ hhgil@elpoli.edu.co - Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid

⁴ mmarquez@unal.edu.co - Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín

ranging from 2.7 % to 4.5 % (interior and exterior). The presence of calcium carbonate was confirmed in the form of vaterite and calcite. These findings provide essential insights for advancing the development of a standardized protocol for producing bio-bricks as a sustainable alternative construction material.

Palabras clave: Bioladrillos, biocementación, carbonato de calcio, MICP, materiales sostenibles, *Sporosarcina pasteurii*

1. Introducción

La precipitación de carbonato de calcio inducida por microorganismos (MICP) ha demostrado ser una biotecnología versátil, con un potencial transformador para el desarrollo de soluciones sostenibles en la ingeniería civil. Las investigaciones recientes muestran que, mediante el diseño adecuado de procesos y materiales, es posible obtener materiales alternativos, comparables con materiales estabilizados con cal o cemento, extendiendo su aplicabilidad a diversos contextos geotécnicos y estructurales. La fabricación de bioladrillos mediante la MICP, representa una alternativa innovadora y sostenible frente a los ladrillos convencionales que requieren altas temperaturas para su cocción, como el caso de ladrillos de arcilla, o uso de cemento. [Bernardi et al. \(2014\)](#) desarrollaron bioladrillos a base de arena sílicea utilizando un sistema de tratamiento por percolación, alcanzando resistencias a compresión de hasta 2 MPa, suficientes para aplicaciones no estructurales. [Bu et al. \(2018\)](#) utilizaron moldes de contacto total con inmersión sucesiva en solución cementante, logrando resistencias de 420 kPa a compresión y 950 kPa a flexión. [Murmu y Patel \(2018\)](#) integraron ceniza de bagazo de caña y polvo de piedra como agregados para bioladrillos tratados por MICP. Más recientemente, [Zhuang et al. \(2025\)](#) demostraron que el uso de agregados reciclados de concreto tratado con MICP puede restaurar significativamente la resistencia mecánica y disminuir la porosidad de los ladrillos reciclados. El presente trabajo busca establecer un protocolo de diseño para la fabricación de bioladrillos, utilizando como materia prima una arena residuo o subproducto de la explotación minera de caolín y la precipitación de carbonatos inducida por microorganismos (MICP) con la bacteria *Sporosarcina pasteurii*.

2. Métodos y materiales

Materiales: Se seleccionó como materia prima para la fabricación de los bioladrillos, una arena de sílice, que es un residuo de la explotación minera de caolín de la empresa Sumicol S.A.S, ubicada en el municipio de La Unión (Antioquia). La arena es una arena gruesa con un diámetro efectivo de 0,42 mm, sin contenido de finos y clasifica como arena pobremente gradada (SP) en el USCS. El análisis mineralógico muestra que está compuesta 95 % de cuarzo, 4 % de caolinita y 1 % de otros minerales de las arcillas. Posee un pH medianamente ácido pH = 5,98. El microorganismo seleccionado para la MICP, es una cepa de *Sporosarcina pasteurii* 323 (Sp) de la DSMZ, la cual fue activada y cultivada hasta alcanzar un OD600 entre 0,6 y 1 (1×10^8 cel/ml).

Métodos: Para establecer el protocolo de diseño, la etapa experimental se divide en dos fases. Fase I de selección de parámetros de diseño a escala de Erlenmeyer, teniendo como

variables la fuente y concentración de calcio, para lo cual se utilizaron cloruro de calcio y acetato de calcio en dos concentraciones 0,5 y 0,75 M. Una fase II de escalado del proceso, con los parámetros seleccionados de la fase I, utilizando un molde rígido y el método de inmersión para fabricar los bioladrillos.

Fase I: En la fase I se utilizó una escala de trabajo con 20 g de suelo y 200 ml de medio líquido compuesto por: medio de cultivo, inóculo de 10 % de Sp y una solución de cementación (urea y fuente de calcio). El experimento se mantuvo en agitador a 120 rpm, a una temperatura controlada de 30°C. Se tomaron medidas cada 24 h de: pH, actividad ureasa (AU) por el método de Phenol-hipoclorito, concentración de calcio por método de titulación con EDTA, oxígeno disuelto (OD) y biomasa por cámara de Neubauer. Fase II: En la fase II se utilizó una escala de trabajo con 411 g de suelo y 95 ml de medio líquido compuesto de inóculo, medio de cultivo y solución de cementación, para alcanzar la humedad óptima de compactación de la arena. La aplicación de la MICP se hizo por etapas: i) inoculación de la arena con el microorganismo, dejando actuar durante 2 horas (95 ml). ii) colocación de la arena en el molde por vibración hasta alcanzar una densidad de $1,3g/cm^3$, y posteriormente sumergir en 2000 ml de medio de cultivo y solución de cementación (método de inmersión completa). Este tratamiento se aplicó tres veces. El biorreactor se programó con una agitación de 50 rpm y trabajó a temperatura ambiente. Durante cada tratamiento se midió: pH, AU y concentración de calcio.

Al finalizar los bioensayos de la fase I y II, se analizaron las fases mineralógicas presentes en la arena mediante Espectroscopía de Transmisión de Infrarrojo con Transformada de Fourier (FTIR) y Difracción de rayos X (DRX), y se hizo la cuantificación del carbonato de calcio por pérdida de peso del suelo al reaccionar el CC con ácido clorhídrico (HCl).

3. Resultados y Discusión

FASE I: Se determinó un periodo límite de 72 horas (3 días), en el cual se da la adaptación y posterior crecimiento exponencial de la población bacteriana, aumento de la AU de la *Sporosarcina pasteurii*, la consecuente acidificación del medio líquido con una disminución del pH de 8,5 a 7,1, y el agotamiento del calcio en solución (Figura 1).

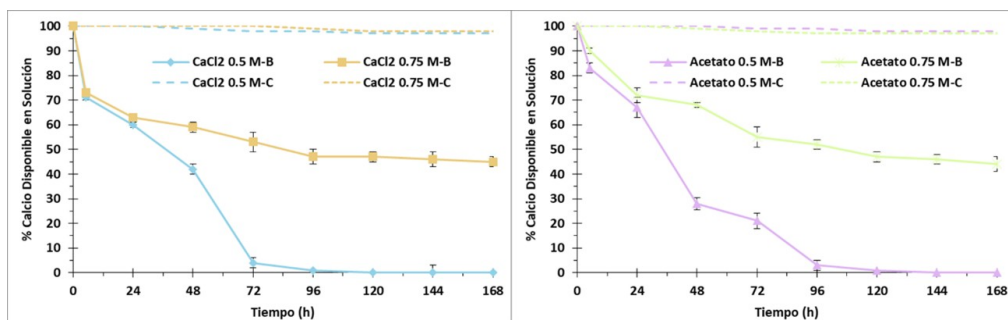


Figura 1: Comportamiento del calcio en solución durante la fase I.

Este periodo de 72 h corresponde al tiempo en que ocurre el proceso de MICP, seguido por la alcalinización del medio debido a la liberación de amonio como residuo de la activi-

dad metabólica. En esta fase, se corrobora que la precipitación de CC es mediada por los microorganismos.

La cuantificación de CC medida por ataque ácido muestra una precipitación mínima de 32 % en peso con acetato de calcio 0,75 M y máxima de 52 % con cloruro de calcio 0,5 M (Figura 2). A partir del análisis mineralógico se evidenció la precipitación de carbonato de calcio en su polimorfo vaterita. Únicamente en el tratamiento con cloruro de calcio 0,5 M se precipitó calcita, considerada como el polimorfo más estable de CC. Con estos resultados, de la fase I se seleccionó como mejor fuente de calcio el cloruro de calcio a una concentración 0,5 M.

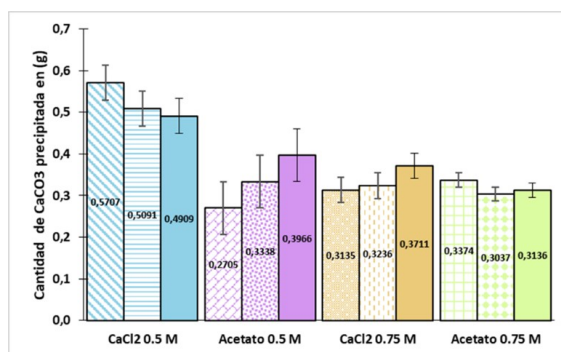


Figura 2: Carbonato de calcio precipitado en la fase I.

FASE II: Para la fabricación de los bioladrillos se utilizó una solución de cementación equimolar compuesta de urea y cloruro de calcio en una concentración 0,5 M y un período de 3 días como tiempo límite. La Figura 3 muestra el biorreactor diseñado y fabricado para aplicar el tratamiento de MICP en la arena por el método de inmersión completa del molde rígido.

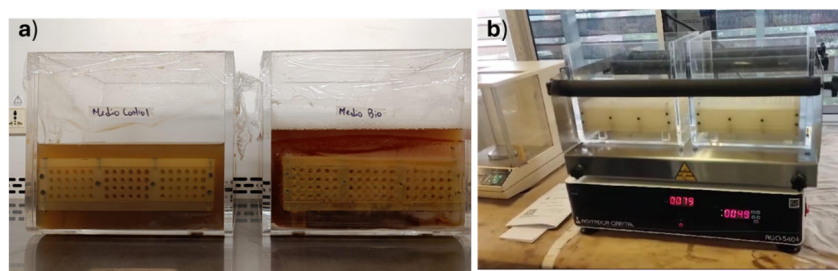


Figura 3: Bioensayo fase II. a) Moldes rígidos dentro de biorreactor. b) biorreactor en agitador orbital.

Los resultados muestran que la solución de cementación presenta un periodo de acidificación durante las 72 h del tratamiento por MICP, alcanzando un mínimo de pH de 7,6 en promedio en los tres tratamientos, mientras que el calcio disponible llega a un mínimo del 20 % al finalizar las 72 h (Figura 4).

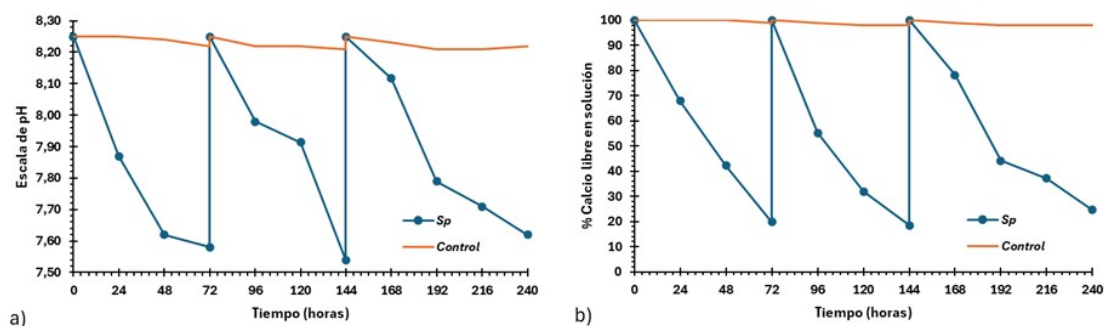


Figura 4: Comportamiento de variables durante el bioensayo fase II. a) pH. b) calcio en solución

Con este diseño de experimento, se obtuvieron bioladrillos (Figura 5-a) conformados con una dimensión de 15,4 cm (largo), 5,4 cm (ancho) y 3,8 cm (alto). Sin embargo, la precipitación de CC no fue homogénea, obteniéndose mayor cementación en la parte externa del ladrillo y menor cementación en la parte interna, debido probablemente a la dificultad de la solución de cementación de penetrar hasta el interior de la arena. También se observó una aparente pérdida de cementación al permanecer el ladrillo a temperatura ambiente durante 7 días después de terminar el bioensayo (Figura 5-b).

Para cuantificar el CC precipitado durante la fase II, fueron seleccionadas muestras del interior y de la parte exterior (periferia) de los bioladrillos, y se obtuvo una precipitación de 2,7 % en peso de CC en el interior y 4,5 % en el exterior del bioladrillo. Esta precipitación de CC fue muy inferior a la obtenida en la fase I con 0,5 M de $CaCl_2$. Los resultados de FTIR y DRX evidencian la formación de CC en los bioladrillos.

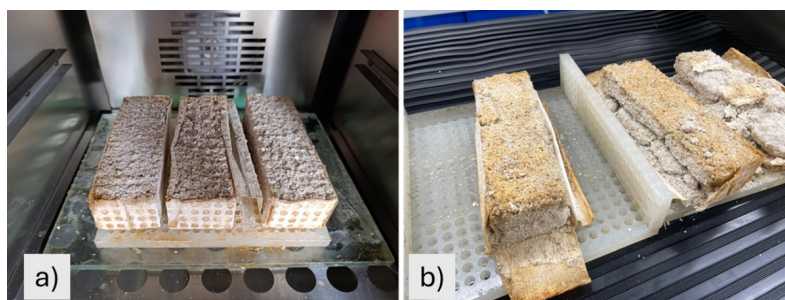


Figura 5: Bioladrillos Fase II. a) Bioladrillos al terminar bioensayo. b) Cementación no homogénea observada 72 h después de terminado el bioensayo.

4. Qué sigue para los Bioladrillo?

Diseño del protocolo

- Cementación homogénea: hipótesis: influencia negativa de la caolinita presente en la arena (Meza, 2019)
- Caracterización mecánica de los bioladrillos
- Cumplimiento de normas para mampostería no estructural (NTC 922)

Optimización del proceso de producción

- Uso de reactivos de grado comercial o materia prima (urea, fuente de calcio, etc) producto de desechos
- Validación de la reproducibilidad
- Durabilidad de la biocementación en el tiempo

5. Conclusiones

- Para establecer un protocolo de fabricación de bioladrillos, es necesario definir en una fase I las mejores condiciones de precipitación de CC por MICP por hidrólisis de urea, siendo la variable de estudio la fuente y concentración de calcio, y la variable respuesta, el contenido de CC precipitado. El contenido de calcio disponible en solución se convierte en el reactivo límite para establecer el tiempo de finalización de la MICP.
- Al hacer el escalado del proceso, intervienen otras variables (densidad, temperatura, oxigenación) que afectan y restan eficiencia a la MICP, y, por tanto, disminuyen la precipitación de CC y la biocementación de la arena para lograr un bioladrillo. No obstante, los resultados obtenidos muestran que es posible obtener bioladrillos a partir de una arena que es un subproducto de la explotación minera, dándole un uso a este “residuo” del proceso de extracción, y constituyéndose en un avance en innovación en materiales y construcción sostenible.

Referencias

- Bernardi, D., DeJong, J., Montoya, B., y Martinez, B. (2014). Bio-bricks: biologically cemented sandstone bricks. *Construction and Building Materials*, 55, 462-469.
- Bu, C., Wen, K., Liu, S., Ogbonnaya, U., y Li, L. (2018). Development of bio-cemented constructional materials through microbial induced calcite precipitation. *Materials and Structures*, 51(30).
- Meza, V. E. (2019). *Influência da mineralogia do solo na bioprecipitação de carbonatos como técnica de cimentação de solos* (Tesis Doctoral no publicada). Universidade de Brasília.
- Murmu, A. L., y Patel, A. (2018). Towards sustainable bricks production: An overview. *Construction and Building Materials*, 165, 112-125. Descargado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061818300382> doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.038>

Zhuang, D., Chen, S., Li, J., Han, S., y Guo, Y. (2025). Recycled coarse aggregate from waste concrete strengthened by microbially induced calcium carbonate precipitation. *Environmental Technology & Innovation*, 37, 103981. Descargado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352186424004577> doi: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2024.103981>

Método indirecto para la predicción de índice de vegetación a partir de imágenes satelitales de radar de apertura sintética

Paula Andrea Muñoz-Uribe¹, Ahmed Alejandro Cardona-Mesa², Rubén Darío Vásquez-Salazar³, Jean Pierre Diaz-Paz⁴, Santiago Zapata-Vargas⁵,

Resumen

Este trabajo presenta el uso de la señal radar de Sentinel-1 en polarizaciones VV y VH para generar un NDVI sintético, útil cuando la nubosidad o la falta de luz limitan la observación óptica. Se emplearon 2 200 pares de imágenes de 512×512 píxeles procedentes de Sentinel-1 y Sentinel-2. A los canales VV y VH se añadieron los índices VV/VH, RVI y RVI4S1, formando cubos de cinco canales. Dos modelos de aprendizaje profundo se entrenaron durante 100 épocas con la pérdida L1 y el optimizador Adam: una CNN tipo encoder-decoder y un autoencoder basado en U-Net; el 30 % de los datos se reservó para validación independiente. Los resultados cualitativos muestran que ambas redes reproducen la distribución espacial del NDVI óptico. La CNN mantiene bordes nítidos —ríos y linderos de cultivo— pero introduce un patrón cuadriculado en superficies homogéneas, mientras que el autoencoder genera mapas más uniformes y limpios, aunque suaviza contornos finos. La elección del modelo depende de la prioridad: precisión de bordes con la CNN o homogeneidad regional con el autoencoder. En conjunto, la estrategia multicanal propuesta amplía el valor de los datos SAR para el seguimiento agrícola y ambiental, ofreciendo un método práctico para estimar el NDVI allí donde las imágenes ópticas son escasas o inexistentes.

Abstract

This study showcases the use of Sentinel-1 radar data in VV and VH polarizations to generate a synthetic NDVI, particularly valuable when cloud cover or low light hampers optical observation. A dataset of 2,200 image pairs (512 × 512 pixels) from Sentinel-1 and Sentinel-2 was compiled. The VV and VH channels were augmented with the VV/VH ratio, RVI, and RVI4S1 indices, yielding five-channel input cubes. Two deep-learning models were trained for 100 epochs with the L1 loss and the Adam optimizer: an encoder-decoder CNN and a U-Net-based autoencoder; 30 % of the data was held out for independent validation. Qualitative results show that both networks reproduce the spatial distribution of the reference optical NDVI. The CNN preserves sharp edges—such as rivers and field boundaries—but introduces a checkerboard pattern in homogeneous areas, whereas the autoencoder produces cleaner, more uniform maps while slightly blurring fine contours. Model choice therefore depends on priorities:

¹ paula.munoz@iudigital.edu.co - Facultad de Ciencias y Humanidades. Institución Universitaria Digital de Antioquia

² amhed.cardona@iudigital.edu.co - Facultad de Ciencias y Humanidades. Institución Universitaria Digital de Antioquia

³ rdvasquez@elpoli.edu.co - Facultad de Ingeniería. Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid

⁴ jpdiaz@elpoli.edu.co - Facultad de Ingeniería. Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid

⁵ santiago.zapata@est.iudigital.edu.co - Facultad de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias. Institución Universitaria Digital de Antioquia

edge precision with the CNN versus regional smoothness with the autoencoder. Overall, the proposed multi-channel strategy enhances the value of SAR data for agricultural and environmental monitoring, providing a practical means to estimate NDVI where optical imagery is scarce or unavailable.

Palabras clave: *Synthetic Aperture Radar, Synthetic NDVI, Deep Learning, Sentinel-1, Image Translation*

1. Introducción

Los sensores *pasivos* (cámaras multiespectrales/hiperespectrales) registran la luz solar reflejada en varias longitudes de onda, mientras que los *activos*, como el radar de apertura sintética (SAR) o el LiDAR, emiten microondas o pulsos láser y analizan la señal retrodispersada. Ambas familias suministran información valiosa para agricultura, gestión ambiental y monitoreo ecológico. Entre los productos derivados, el *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) sigue siendo la referencia para evaluar el vigor y la densidad de la vegetación gracias a su fórmula sencilla y su probada relación con variables biofísicas como la biomasa y la fracción de cobertura verde (Huang, Tang, Hupy, Wang, y Shao, 2020).

A diferencia de los sensores ópticos, cuya dependencia de la luz solar y vulnerabilidad a nubes, humo o niebla restringe la frecuencia de revisita y deja vacíos temporales en el monitoreo, el SAR emite microondas y capta la señal retrodispersada, operando día y noche con escasa influencia atmosférica (Wei et al., 2020); esta capacidad de “ver” a través de la cobertura nubosa ofrece series temporales más densas y, gracias a la información de fase y a su sensibilidad dieléctrica, permite extraer parámetros biofísicos que complementan los productos ópticos (Singh, Diwakar, Shankar, Shree, y Kumar, 2021).

Este estudio explora las polarizaciones VV y VH de *Sentinel-1* para construir combinaciones algebraicas e incorporar relaciones no lineales que, a través de un modelo de aprendizaje profundo, generan un NDVI sintético equiparable al obtenido con datos ópticos. La propuesta se verifica mediante una inspección visual detallada y una comparación cualitativa con el NDVI de referencia, mostrando el potencial de la información SAR para describir la estructura y humedad de la cobertura vegetal.

El artículo se organiza de la siguiente manera. El Capítulo 2 describe el conjunto de datos, los recursos computacionales y la metodología experimental. Los resultados se presentan en el Capítulo 3. Posteriormente, el Capítulo 4 discute los hallazgos y analiza las limitaciones. Finalmente, la Sección 5 resume las conclusiones principales.

2. Métodos y materiales

Esta sección presenta los elementos clave del estudio: (i) el conjunto de datos con imágenes Sentinel-1 y Sentinel-2, (ii) los índices ópticos y radar empleados, (iii) los modelos de aprendizaje profundo seleccionados, y (iv) la metodología experimental que sustenta la generación de NDVI sintético a partir de imágenes SAR.

2.1. Conjunto de datos

El estudio emplea imágenes de las misiones *Sentinel-1* (radar) y *Sentinel-2* (óptico). Los datos SAR VV y VH en modo *Ground Range Detected* (GRD) banda C (5.4 GHz, 10 m de resolución) se obtuvieron del Alaska Satellite Facility ([NASA, 2023](#)). Cada escena GRD fue multilookada, georreferenciada al elipsoide WGS84 y corregida por terreno; los valores de píxel representan amplitud detectada.

Las escenas ópticas proceden de ([GoogleInc, 2024](#)). A partir de las bandas 2 (R) y 8 (NIR) se calculó internamente el NDVI para las mismas regiones cubiertas por el radar. Se seleccionaron fechas comprendidas entre el 1 de enero de 2017 y el 1 de marzo de 2024, dentro de un marco espacial de latitudes -40° a 40° y longitudes -179° a 179° . Para asegurar la calidad, solo se aceptaron píxeles con menos de un 5 % de nubes o nieve, 40 % de agua y 20 % de vegetación no deseada.

El conjunto resultante contiene 2200 pares de recortes $512 \text{ px} \times 512 \text{ px}$ y está disponible públicamente en ([Garavito-González, 2024](#)). La Figura 1 muestra cuatro ejemplos representativos.

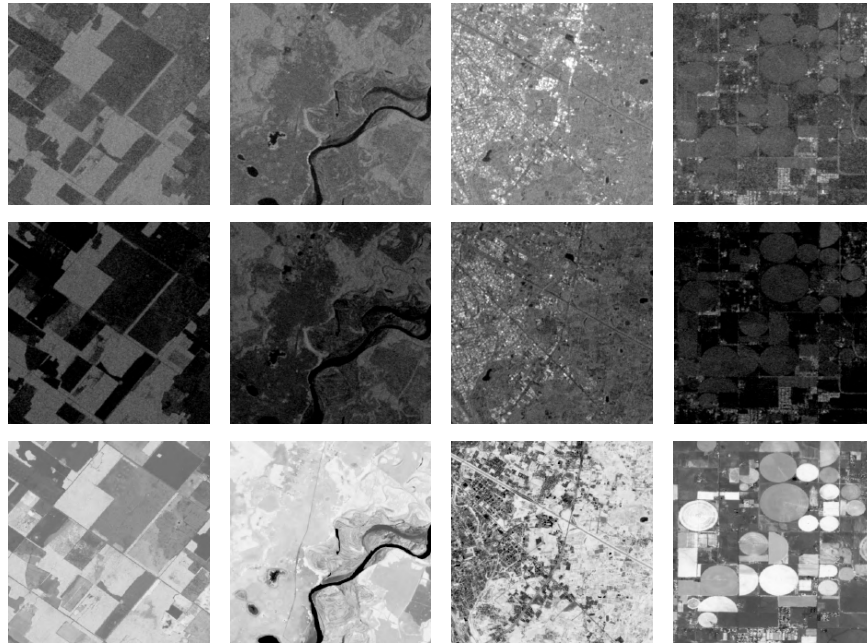


Figura 1: Muestras del conjunto de datos: de arriba abajo, polarización VV, VH y NDVI óptico; de izquierda a derecha, cuatro recortes distintos.

2.2. Índices ópticos de vegetación

Los índices de vegetación son relaciones espectrales diseñadas para resaltar rasgos biofísicos de la vegetación —por ejemplo, la actividad fotosintética, la fracción de cobertura vegetal

o el contenido hídrico del dosel— a partir de reflectancias en bandas específicas del espectro electromagnético. Aun cuando existen decenas de índices, su eficacia depende del sensor, los algoritmos de composición, los procedimientos de corrección atmosférica y la geometría Sol–blanco–sensor. Las diferencias resultantes pueden conducir a interpretaciones dispares sobre la dinámica de los ecosistemas, lo que subraya la importancia de aplicar protocolos consistentes y verificar de forma cruzada los productos generados (Zeng et al., 2022).

La misión *Sentinel-2* ofrece imágenes multispectrales con bandas en el rango visible (VIS), infrarrojo cercano (NIR) e infrarrojo de onda corta (SWIR), todas con resoluciones espaciales de 10 m a 20 m. Esta combinación espectral permite calcular índices como el *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), el *Green NDVI* (GNDVI), el *Normalized Difference Water Index* (NDWI), el *Normalized Difference Moisture Index* (NDMI), el *Moisture Stress Index* (MSI) o el *Normalized Moisture Stress Index* (NMSI), entre otros (Caruso y Palai, 2023). Cada índice enfatiza un aspecto diferente: mientras NDVI y GNDVI se centran en la absorción de clorofila, NDMI y MSI son más sensibles al contenido de agua de la vegetación y NDWI realza cuerpos de agua superficiales.

De todos ellos, el NDVI es el más empleado por su simplicidad y su alta correlación con variables biofísicas como la biomasa aérea o la fracción de cobertura vegetal (Huang et al., 2020). Su cálculo, siguiendo (Lasaponara et al., 2022), se expresa en (1):

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}, \quad (1)$$

donde *NIR* corresponde a la reflectancia en el infrarrojo cercano (banda 8 de Sentinel-2) y *R* a la reflectancia en la región roja del espectro visible (banda 2 de Sentinel-2).¹

En este trabajo el NDVI óptico sirve como referencia para evaluar la metodología propuesta basada en imágenes SAR. Con ello se busca explorar la capacidad de los datos radar de reemplazar, complementar o interpolar series temporales ópticas, particularmente en regiones con nubosidad persistente.

2.3. Índices de vegetación derivados de radar

En el dominio de radar, los índices de vegetación se construyen a partir de las diferentes polarizaciones que registran los satélites. Para *Sentinel-1*, las zonas de estudio disponen únicamente de los canales VV y VH, suficientes para derivar métricas empíricas relacionadas con la estructura y la humedad de la cobertura vegetal.

La literatura recoge numerosos índices basados en estos dos canales, entre ellos: el *Polarimetric Radar Vegetation Index* (PRVI) (Chang, Shoshany, y Oh, 2018), el *Radar Forest Degradation Index* (RFDI) (Flores-Anderson, Herndon, Thapa, y Cherrington, 2019), el *Radar Vegetation Index for Sentinel-1* (RVI4S1) (Bhogapurapu et al., 2022), el clásico *Radar Vegetation Index* (RVI) (Trudel, Charbonneau, y Leconte, 2012), el *Sentinel Normalized Index* (SNI) (Filgueiras, Mantovani, Althoff, Filho, y da Cunha, 2019), las variantes de rango dinámico amplio $WDRVI_{High}$ y $WDRVI_{Low}$ (Gitelson, 2004), así como las razones simples

¹En la nomenclatura oficial de Sentinel-2 la banda roja es la B4; aquí se mantiene la referencia interna al archivo original del conjunto de datos, donde el canal rojo fue almacenado como `band_2`.

VH/VV y VV/VH (Veloso et al., 2017; Frison et al., 2018). La Tabla 1 resume sus expresiones fundamentales.²

	Abreviatura	Nombre completo	Fórmula
1	PRVI	Polarimetric Radar Vegetation Index	$\left(1 - \frac{VV}{VH+VV}\right) * VH$
2	RFDI	Radar Forest Degradation Index	$\left(\frac{VV-VH}{VH+VV}\right)$
3	RVIFS1	Radar Vegetation Index for Sentinel-1	$\sqrt{\frac{VV}{VH+VV} * \frac{4VH}{VH+VV}}$
4	RVI	Radar Vegetation Index	$\frac{4VH}{VH+VV}$
5	SNI	Sentinel Normalized Index	$\frac{VH-VV}{VH+VV}$
6	WDRVIHigh	Wide Dynamic Range Vegetation Index High	$\frac{VH+30}{VH+VV}$
7	WDRVILow	Wide Dynamic Range Vegetation Index Low	$\frac{20}{VH+25}$
8	VH_VV_Ratio	Relación VH/VV	$\frac{VH}{VV}$
9	VV_VH_Ratio	Relación VV/VH	$\frac{VV}{VH}$

Tabla 1: Índices SAR de vegetación y sus fórmulas a partir de las polarizaciones VV y VH. Adaptada de (Pelta et al., 2022)

De forma más reciente, (Pelta et al., 2022) propuso *SNAF* (*Sentinel-1 to NDVI for Agricultural Fields*), un enfoque hiperlocal basado en bosques aleatorios que convierte series temporales SAR en NDVI óptico. El método calcula seis de los índices anteriores como variables independientes y entrena el modelo para cada nueva escena, pues la relación entre la retrodispersión y el NDVI varía en el espacio y en el tiempo. Este precedente motiva la búsqueda de estrategias que permitan estimar NDVI a partir de imágenes SAR con menor dependencia de calibraciones locales.

2.4. Modelos de aprendizaje profundo

Los modelos de aprendizaje profundo han demostrado una notable capacidad para aprender mapeos complejos entre dominios de imagen, fenómeno conocido como *traducción de imagen a imagen*. En el contexto de este trabajo, su objetivo es inferir la variación espectral asociada al NDVI óptico a partir de la señal radar procesada y de los índices VV–VH descritos en la Sección 2.3.

2.4.1. Redes neuronales convolucionales

Las *redes neuronales convolucionales* (CNN) se basan en la aplicación de núcleos de convolución que actúan como filtros de características locales, compartiendo pesos a lo largo de la imagen y reduciendo drásticamente el número de parámetros (?, ?). Su arquitectura típica alterna capas de convolución, activación no lineal y normalización, seguidas de *pooling* o convoluciones con *stride* para la reducción espacial.

Para la traducción VV–VH $\rightarrow$ NDVI, se adopta una arquitectura *encoder–decoder* pura: el codificador extrae representaciones jerárquicas de textura y estructura, mientras que el deco-

²Los valores de retrodispersión corresponden al coeficiente σ^0 en dB.

ificador las reexpande hasta la resolución original. El entrenamiento se realiza minimizando la distancia L_1 entre la salida $\hat{y}$ y la imagen objetivo y , lo que favorece predicciones suaves y con menor sobreajuste a valores extremos:

$$\mathcal{L}_{\text{CNN}} = \|y - \hat{y}\|_1. \quad (2)$$

2.4.2. Autoencoder

El *autoencoder* amplía la idea anterior introduciendo una representación latente comprimida z de dimensión mucho menor que la imagen, que fuerza a la red a capturar los patrones esenciales del fenómeno (Mohammadi, Islam, y Belhaouari, 2024). En este trabajo se emplea una variante tipo *U-Net* con conexiones de *skip*, que copian y concatenan características de las capas de codificación con las equivalentes de decodificación para preservar detalles de alta frecuencia:

$$z = f_{\text{enc}}(x), \quad \hat{y} = f_{\text{dec}}(z) \oplus \text{skip}(x), \quad (3)$$

donde $\oplus$ denota la concatenación de características. Esta arquitectura facilita que la red modele tanto la información contextual de baja resolución como los contornos finos críticos para reproducir variaciones locales del NDVI.

2.5. Metodología experimental

El objetivo central de este estudio es aprender un mapeo imagen a imagen que traslade la información registrada por *Sentinel-1* en polarizaciones VV y VH al dominio espectral óptico, concretamente al plano del NDVI derivado de *Sentinel-2*. Para ello se diseñó un flujo de trabajo dividido en cuatro etapas: preprocesamiento, generación de cubos multicanal, entrenamiento de modelos y evaluación visual.

2.5.1. Preprocesamiento radar

Cada escena GRD se calibró a σ^0 , se convirtió de escala dB a lineal y se recortó a $512 \text{ px} \times 512 \text{ px}$. Las dos polarizaciones se normalizaron individualmente a $[0, 1]$, preservando el contraste entre texturas de suelo y vegetación.

2.5.2. Construcción de cubos de entrada

Además de los canales VV y VH, se incluyeron tres índices radar que pueden reforzar la señal biofísica: Relación VV/VH (*VV_VH_Ratio*), *Radar Vegetation Index* (RVI) y *Radar Vegetation Index for Sentinel-1* (RVI4S1).

La combinación básica (2 canales) y la ampliada hasta (5 canales) se apilaron como tensores $\mathbb{R}^{H \times W \times C}$ con $C \in \{2, 5\}$, de modo que cada modelo pudiera explorar diferentes niveles de información.

2.5.3. Configuración de entrenamiento

Los modelos descritos en la Sección 2.4 se implementaron en **TensorFlow-Keras**. El conjunto de datos se dividió en 70 % para entrenamiento y 30 % para validación, garantizando independencia espacial y temporal. Se utilizó función de pérdida L_1 , optimizador Adam ($\alpha = 2 \times 10^{-4}$, $\beta_1 = 0,5$) con 100 épocas y tamaño de lote de 8 imágenes.

2.5.4. Evaluación cualitativa

Tras el entrenamiento, se generaron predicciones sobre el subconjunto de validación. La comparación se llevó a cabo mediante inspección visual lado a lado entre el NDVI óptico y el NDVI sintético. Este análisis se centró en consistencia espacial, incluyendo gradientes suaves en áreas de vegetación continua y preservación de bordes, sensibilidad a la cobertura vegetal, describiendo la capacidad de discriminar entre suelos desnudos, pastizales y cultivos densos, y finalmente la ausencia de artefactos, verificando que el modelo no introduzca patrones fantasmas ni texturas ajenas al NDVI.

El procedimiento anterior permite valorar la viabilidad de extender series temporales de NDVI en regiones con nubosidad persistente, valiéndose únicamente de adquisiciones SAR.

3. Resultados

Los modelos se entrenaron siguiendo la configuración descrita en la Sección 2.5. Se evaluaron exclusivamente las dos arquitecturas seleccionadas, la red neuronal convolucional (CNN) *encoder-decoder* y el autoencoder tipo *U-Net*, ambas con entradas de cinco canales (VV, VH, VV/VH, RVI y RVI4S1).

La Figura 2 muestra cuatro imágenes diferentes de izquierda a derecha, donde se compara la referencia NDVI óptica (fila superior) con las salidas de la CNN (fila intermedia) y del autoencoder (fila inferior).

El modelo **CNN** reproduce con nitidez los contornos principales (p.ej. cauces fluviales y límites de parcelas), pero introduce artefactos cuadrículados y ruido granular que interrumpen los gradientes suaves propios del NDVI. Dichos artefactos son más notorios en superficies homogéneas —segunda y tercera columnas—, donde aparecen patrones regulares no presentes en la imagen de referencia.

La salida del **Autoencoder** presenta un aspecto más uniforme, sin el patrón cuadrículado observado en la CNN. Los gradientes de vegetación se mantienen continuos y coherentes, lo que sugiere una mejor generalización espacial. No obstante, el proceso de compresión latente tiende a suavizar detalles finos: en la primera columna se pierde parte de la textura ribereña y, en las escenas agrícolas, los límites de campo se difuminan.

4. Discusión

La inspección visual de la Figura 2 muestra que ambos enfoques de aprendizaje profundo son capaces de traducir la señal SAR al dominio NDVI con un nivel de realismo significativo, pero cada arquitectura presenta fortalezas y debilidades distintas que se deben considerar.

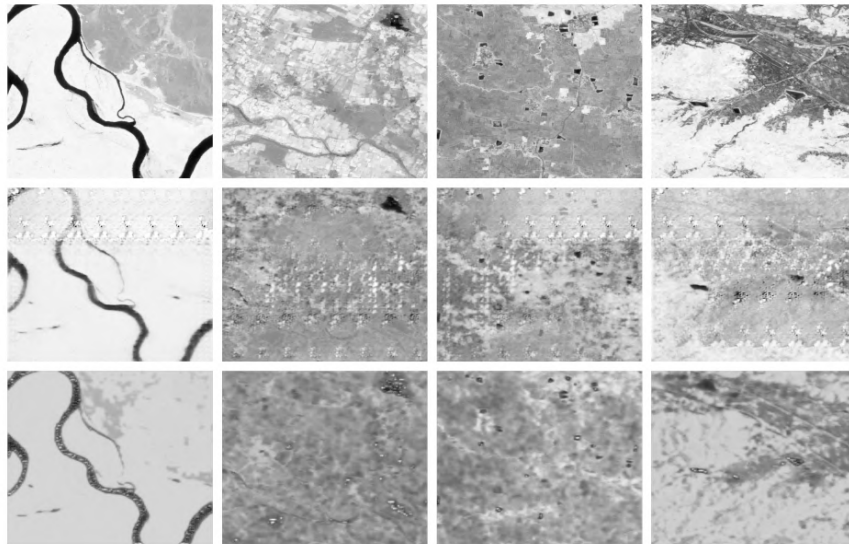


Figura 2: Comparación visual, de arriba abajo, la referencia NDVI óptica, la predicción de la CNN y la predicción del autoencoder.

4.1. Contraste entre nitidez y homogeneidad

El modelo de CNN reproduce detalles lineales —bordes de ríos, carreteras y linderos agrícolas— con notable precisión, lo que confirma la sensibilidad de las capas convolucionales a las transiciones bruscas de la retrodispersión. Sin embargo, el patrón cuadriculado y el moteado fino presentes en las zonas más homogéneas indican un exceso de dependencia de filtros locales: la red parece memorizar texturas específicas y las manifiesta donde la información contextual es limitada.

El autoencoder presenta resultados visualmente más limpios y coherentes. El cuello de botella aplica una compresión que obliga a la red a mantener la información estructural más relevante, disminuyendo el ruido de alta frecuencia. La consecuencia negativa es la atenuación de contornos y la tendencia a suavizar bordes, una pérdida de definición que puede ser crítica para aplicaciones más exigentes.

4.2. Limitaciones y oportunidades

Dos aspectos importantes limitan la generalización de los resultados. El conjunto de datos, aunque geográficamente diverso, no incorpora información sobre la variaciones de humedad, condición que afecta la retrodispersión radar. Y la evaluación se restringió a inspección visual, dado que el objetivo inicial era observar artefactos antes de llegar a conclusiones numéricas. Futuras fases incluirán la medición de métricas cuantitativas.

5. Conclusiones

La arquitectura *CNN* logra una traducción SAR→NDVI con buena fidelidad en los contornos, lo que la convierte en una opción para aplicaciones donde la delimitación precisa de ríos, caminos o linderos agrícolas es importante. Pero la aparición de artefactos y ruido de alta frecuencia evidencia la necesidad de regularización adicional para mejorar la homogeneidad en superficies extensas.

La compresión latente del *autoencoder* proporciona mapas NDVI más continuos y con menor presencia de artefactos, virtud que favorece análisis regionales y estudios de tendencia temporal. El sacrificio de nitidez en bordes finos invita a combinar esta arquitectura con estrategias multiescala o módulos de realce de detalles.

Al ampliar los canales de entrada con índices radar específicos (VV/VH, RVI, RVI4S1), la traducción entre dominios se fortalece sin depender de información óptica concurrente. Este enfoque abre la puerta a generar series continuas de NDVI en zonas con nubosidad persistente, optimizando el monitoreo agrícola y ambiental en regiones tropicales y andinas donde los vacíos de datos ópticos son frecuentes.

Referencias

- Bhogapurapu, N., Dey, S., Mandal, D., Bhattacharya, A., Karthikeyan, L., McNairn, H., y Rao, Y. S. (2022). Soil moisture retrieval over croplands using dual-pol l-band grd sar data. *Remote Sensing of Environment*. Descargado de <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:246418305>
- Caruso, G., y Palai, G. (2023). Assessing grapevine water status using sentinel-2 images. *Italus Hortus*.
- Chang, J. G., Shoshany, M., y Oh, Y. (2018). Polarimetric radar vegetation index for biomass estimation in desert fringe ecosystems. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 56, 7102-7108.
- Filgueiras, R., Mantovani, E. C., Althoff, D., Filho, E. I. F., y da Cunha, F. F. (2019). Crop ndvi monitoring based on sentinel 1. *Remote Sensing*, 11, 1441.
- Flores-Anderson, A. I., Herndon, K. E., Thapa, R. B., y Cherrington, E. (2019). *Sar handbook comprehensive methodologies for forest monitoring and biomass estimation*. Servir Global. doi: 10.25966/nr2c-s697
- Frison, P.-L., Fruneau, B., Kmiha, S., Soudani, K., Dufrene, E., Toan, T. L., ... Rudant, J.-P. (2018). Potential of sentinel-1 data for monitoring temperate mixed forest phenology. *Remote Sensing*, 10, 2049.
- Garavito-González, A. F. (2024). *Dataset of sentinel-1 sar and sentinel-2 ndvi imagery*. <https://data.mendeley.com/preview/xjcr5k4c9t?a=35f1e725-0818-4b1e-ae8a-1109ff12e837>. (Accessed on 4 september 2024)
- Gitelson, A. A. (2004). Wide dynamic range vegetation index for remote quantification of biophysical characteristics of vegetation. *Journal of plant physiology*, 161(2), 165-73.

- GoogleInc. (2024). *Harmonized sentinel-2 msi: Multispectral instrument, level-2a*. https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/COPERNICUS_S2_SR_HARMONIZED. (Accessed on 4 september 2024)
- Huang, S., Tang, L., Hupy, J., Wang, Y., y Shao, G. (2020). A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (ndvi) in the era of popular remote sensing. *Journal of Forestry Research*, 32, 1-6.
- Lasaponara, R., Abate, N., Fattore, C., Aromando, A., Cardettini, G., y Fonzo, M. D. (2022). On the use of sentinel-2 ndvi time series and google earth engine to detect land-use/land-cover changes in fire-affected areas. *Remote. Sens.*, 14, 4723.
- Mohammadi, K., Islam, A., y Belhaouari, S. B. (2024). Zooming into clarity: Image denoising through innovative autoencoder architectures. *IEEE Access*, 12, 98816-98834.
- NASA. (2023). *ASF data search*. <https://search.asf.alaska.edu/>. (Accessed on 5 march 2024)
- Pelta, R., Beeri, O., Tarshish, R., y Shilo, T. (2022). Sentinel-1 to ndvi for agricultural fields using hyperlocal dynamic machine learning approach. *Remote Sensing*, 14, 2600.
- Singh, P., Diwakar, M., Shankar, A., Shree, R., y Kumar, M. (2021). A review on sar image and its despeckling. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 28, 4633-4653.
- Trudel, M., Charbonneau, F., y Leconte, R. (2012). Using radarsat-2 polarimetric and envisat-asar dual-polarization data for estimating soil moisture over agricultural fields. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 38, 514-527.
- Veloso, A., Mérmoz, S., Bouvet, A., Toan, T. L., Planells, M., Dejoux, J.-F., y Ceschia, E. (2017). Understanding the temporal behavior of crops using sentinel-1 and sentinel-2-like data for agricultural applications. *Remote Sensing of Environment*, 199, 415-426.
- Wei, S., Zeng, X., Qu, Q., Wang, M., Su, H., y Shi, J. (2020). HRSID: A high-resolution SAR images dataset for ship detection and instance segmentation. *Ieee Access*, 8, 120234-120254.
- Zeng, Y., Hao, D., Huete, A. R., Dechant, B., Berry, J. A., Chen, J.-M., . . . Chen, M. (2022). Optical vegetation indices for monitoring terrestrial ecosystems globally. *Nature Reviews Earth & Environment*, 3, 477 - 493.

Alternativas de aprovechamiento de residuos mineros de EL Bajo Cauca Antioqueño en la industria de la construcción

Julián Lenis¹, Harveth Gil², Juan Ramirez³,

Resumen

El presente proyecto se basa en el aprovechamiento de residuos mineros en la región de El Bajo Cauca Antioqueño en la industria de la construcción, como proceso de economía circular que busca resolver una gran problemática ambiental asociada a la alta producción y nula utilización de suelos estériles, degradados y relaves mineros. Los residuos mineros con potencial aplicación en el sector de la construcción están formados por los minerales descartados de beneficio de oro, los cuales tendrán una amplia evaluación físico-química que permita clasificarlos y caracterizarlos con el fin de determinar su aplicabilidad como material de construcción. Lo anterior, además de ser una gran alternativa de aprovechamiento de residuos sólidos, implica un alivio ambiental, dado que se podrían reemplazar los agregados finos y gruesos de las mezclas de morteros, concreto o vías, los cuales son normalmente extraídos en canteras mediante procesos de minería a cielo abierto. Durante el desarrollo del proyecto, se implementarán herramientas tecnológicas para la evaluación físico-química de suelos, también para la transformación de materiales, trituración y clasificación granulométrica, el proceso de curado y la evaluación mecánica final de los prototipos obtenidos. El proyecto será realizado en alianza con el Grupo de Investigación Minero Ambiental del SENA en el municipio de El Bagre Antioquia.

Palabras clave: Economía circular, residuo minero, materiales de construcción

1. Introducción

Los desechos mineros representan una de las grandes producciones de desechos industriales, los cuales son depositados en forma de tiraderos, a cielo abierto o como rellenos. Mientras que la disposición inapropiada de dichos desechos puede dar como resultado riesgos ambientales. La alta generación y bajas tasas de aprovechamiento de suelos estériles, degradados y relaves de la minería en la región del Bajo Cauca Antioqueño, genera una sobresaturación del espacio terrestre y contaminación ambiental, afectando el suelo y las fuentes hídricas cercanas a las zonas de explotación mineral. Esta cantidad de desechos generados son almacenados en estructuras de contención tipo presa a un alto costo y sin ningún valor agregado (Beltrán-Rodríguez et al. 2018). Por estas razones, actualmente se buscan alternativas de aprovechamiento de residuos mineros en el marco de la economía circular en el marco de los objetivos de desarrollo sostenible ODS (11 – Ciudades y comunidades sostenibles y 12 – Producción y consumo responsable y 15 – vida de ecosistemas terrestres).

El uso de los residuos mineros dentro de una economía circular genera un alivio ambiental, ya que se ha demostrado que estos minerales tienen potencial aplicación en obras civiles, como, por ejemplo,

¹ jalenis@elpoli.edu.co - Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid

² hhgil@elpoli.edu.co - Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid

³ juan_ramirez01161@elpoli.edu.co – Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid

el sector de la construcción, sustituyendo de manera parcial o total los agregados finos y gruesos (Arias Torres et al., 2021) (J.A. Lenis et al. 2023). Actualmente, la región de El Bajo Cauca necesita reducir la cantidad de residuos mineros que se encuentran en las zonas rurales, cercanas a las medianas y pequeñas operaciones mineras, ya que estos materiales contribuyen con la contaminación del medio ambiente y los ecosistemas. Por todo lo anterior, resulta bastante atractiva la idea de poder utilizar estos suelos degradados y relaves mineros en un sector que demanda grandes cantidades de materia prima como lo es la construcción, representando una alternativa de aprovechamiento del material que queda como residuo posterior a la extracción minera, reduciendo el impacto ambiental generado y contribuyendo al desarrollo de las zonas rurales de El Bajo Cauca Antioqueño.

2. Métodos y materiales

A partir de los residuos mineros se realizarán prototipos de materiales de construcción entre los meses 4 y 6 siguiendo el procedimiento descrito en las normas ASTM C31 y ASTM C1329. Las mezclas de los materiales cementantes se prepararán en una amasadora planetaria industrial teniendo en cuenta tres muestras independientes. Se llevará a cabo la caracterización de materiales mediante el uso de un instrumento de microscopía electrónica de barrido (SEM) JSM2490 CV equipado con espectroscopia de rayos-X dispersiva (EDX), difracción de rayos X mediante un difractómetro Empyrean PANalytical y absorción atómica. Después del tiempo de curado de cada muestra, se realizarán ensayos no destructivos para medir propiedades físicas (pulso de ultrasonido, densidad, absorción de humedad) y ensayos destructivos (resistencia a la compresión usando un equipo de carga ADR1000 a una velocidad de 0.25 s $\pm$ 0.05 MPa/.

Referencias

- Arias Torres, S. M., Córdova Castro, J. D., Gómez Botero, A. A. (2021). Alternativas de aprovechamiento de residuos de la industria minera de El Bajo Cauca Antioqueño en el sector de la construcción. *Revista EIA*, 1–6.
- Ashby, M. (2021). *Materials and the environment eco-informed material choice*. Third Edition: Elsevier.
- Beltrán-Rodríguez, L. N., Larrahondo, J. M., Cobos, D. (2018). Tecnologías emergentes para la disposición de relaves: oportunidades en Colombia. *Boletín de Ciencias de La Tierra*, (44), 5–20. <https://doi.org/10.15446/rbct.n44.66617>
- Bogas, J.A.; Silva, M.; Gomes, G. Unstabilized and stabilized compressed earth blocks with partial incorporation of recycled aggregates of recycled aggregates, *Int. J. Arch. Herit.* (2018) 1–16.
- Bollinghaus R, Nixon PJ, Canham I, Page CL (1986) The effect of a Pfa with a high total alkali content on pore solution composition and alkali silica reaction. *Mag Concr Res* 38:30–35. doi: 10.1680/mac.1986.38.134.30.
- Canham I, Page CL, Nixon PJ (1987) Aspects of the pore solution chemistry of blended cements related to the control of alkali silica reaction. *Cem Concr Res* 17:839–844. doi: 10.1016/0008-8846(87)90046-9.
- Duchesne J, Bérubé MA (1994) The effectiveness of supplementary cementing materials in suppressing expansion due to ASR: Another look at the reaction mechanisms part 2: Pore solution chemistry. *Cem Concr Res* 24:221–230. doi: 10.1016/0008-8846(94)90047-7.
- Edraki, M., Baumgartl, T., Manlapig, E., Bradshaw, D., Franks, D. M., Moran, C. J. (2014). Designing mine tailings for better environmental, social and economic outcomes: a review of alternative approaches. *Journal of Cleaner Production*, 84, 411–420.

Fernández Parra, B. Y., Gutiérrez Peñaloza, M. C., Rojas Vargas, D. M. (2020). La Huella De Carbono Del Proceso De Extracción De Materia Prima Para La Producción Del Cemento, Ladrillo Y Acero. Universidad Cooperativa de Colombia.

Fuentes-Molina, N.; Isenia-León, S. A.; Ascencio-Mendoza, J. G. (2019). Adición de lodos residuales en la elaboración de matrices de cerámicas. *Revista EIA*, 16(32), 13-25.7

Gou, M., Zhou, L., Then, N. W. Y. (2019). Utilization of tailings in cement and concrete: A review. *Science and Engineering of Composite Materials*, 26(1), 449-464.

Harp, F. de M. *Statistical Yearbook of Mexican Mining*, Mexico, 2019.

Hernández, A., Varela, E. (2020). Propuesta para la reutilización de residuos y escombros provenientes de los laboratorios de concreto en Villavicencio. Tesis de pregrado, Universidad Santo Tomas, Villavicencio.

Hernández-Ramos, S. M., Trejo-Arroyo, D. L., Cholico-González, D. F., Rodríguez-Torres, G. M., Zárate-Medina, J., Vega-Azamar, R. E., ... Ortiz-Lara, N. (2024). Characterization and effect of mechanical and thermal activation in mining tailings for use as supplementary cementitious material. *Case Studies in Construction Materials*, 20, e02770.

Khalifa, A. Z., Cizer, Ö., Pontikes, Y., Heath, A., Patureau, P., Bernal, S. A., Marsh, A. T. M. (2020). Advances in alkali-activation of clay minerals. *Cement and Concrete Research*, 132(March), 106050. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106050>

Lenis, J.A. et al. 2023. Desarrollo de morteros con geopolímero a partir de residuos mineros en El Bajo Cauca Antioqueño.

Evaluación de una estrategia piloto de movilidad urbana y su contribución a la sostenibilidad – caso Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid

Dora Luz Yepes Palacio¹, Míriam Gómez Marín²,

Resumen

Una de sus principales causas que se atribuyen a la actual crisis climática y energética del nivel global, son las quemadas de combustibles fósiles derivadas del transporte automotor que generan emisiones de gases y partículas a la atmósfera afectando la calidad del aire con consecuencias sobre la economía, la movilidad y la salud. La iniciativa surge como respuesta a las exigencias establecidas por la Ley de Acción Climática para el sector público y a los compromisos nacionales de carbono neutralidad. Asimismo, se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible: el ODS 13 (Acción por el clima), el ODS 11 (Ciudades y comunidades sostenibles), ODS 2 (hambre cero) y el ODS 3 (Salud y bienestar). Además, se vincula al proceso de actualización del Plan Empresarial de Movilidad Sostenible (Plan MES) del PCJIC exigido por la Autoridad ambiental regional Área Metropolitana del Valle de Aburrá - AMVA. El estudio se llevó a cabo como investigación aplicada en el marco de un diseño de estudio de caso articulado al proyecto de micro cuantía “Evaluación de las emisiones asociadas a la movilidad de colaboradores del Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid sede Poblado en el marco del programa carbono neutral” liderado por el grupo de Higiene y Gestión Ambiental GHYGAM en 2024. Los investigadores se propusieron identificar conocimientos relevantes sobre la evaluación de las emisiones generadas por los desplazamientos origen-destino del personal de la institución. A partir de estos hallazgos, se optimizó una estrategia piloto de movilidad sostenible, implementada a través de una aplicación tecnológica móvil que permitiera la integración de diferentes modos de transporte entre colaboradores del PCJIC. La estrategia evaluada en este estudio de caso se denominó “CarPoli” o “Comparte tu carro”. Los resultados evidenciaron beneficios y permitieron identificar aportes a algunos Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) a nivel corporativo. Asimismo, sirvieron como base para la toma de decisiones orientadas a la reducción de emisiones, lo cual se materializó en la elaboración de lineamientos para el plan de reducción de emisiones del PCJIC, con énfasis en la movilidad sostenible.

El conocimiento obtenido, apunta no sólo al cumplimiento de los preceptos normativos, sino también a abrir la posibilidad de replicar los aprendizajes en otras institucionales.

Abstract

One of the main causes attributed to the current global climate and energy crisis is the burning of fossil fuels derived from motor vehicle transportation that generate gas and particle emissions into the atmosphere, affecting air quality and having consequences for the economy, mobility, and health.

¹ Dlyepes@elpoli.edu.co - Docente titular Facultad de Ingeniería Grupo de Higiene y Gestión Ambiental Politécnico colombiano Jaime Isaza Cadavid

² Mgoomez@elpoli.edu.co - Docente titular Facultad de Ingeniería Grupo de Higiene y Gestión Ambiental Politécnico colombiano Jaime Isaza Cadavid

The initiative arises in response to the requirements established by the Climate Action Law for the public sector and the national commitments to carbon neutrality. It is also aligned with the Sustainable Development Goals: SDG 13 (Climate Action), SDG 11 (Sustainable Cities and Communities), and SDG 3 (Good Health and Well-being), SDG 2 (Zero Hunger) and 5 (Gender Equality). Additionally, it is linked to the process of updating the Sustainable Mobility Business Plan (Plan MES) of the PCJIC, as required by the regional environmental authority Área Metropolitana del Valle de Aburrá – AMVA.

The study was carried out as applied research within the framework of a case study design integrated into the small-scale project “Evaluation of emissions associated with the mobility of staff at the Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, Poblado campus, within the framework of the carbon neutrality program”, led by the Environmental Hygiene and Management Research Group (GHYGAM) in 2024.

The researchers aimed to identify relevant insights into the assessment of emissions generated by the institution’s staff commuting patterns. Based on these findings, a pilot sustainable mobility strategy was optimized and implemented through a mobile technology application that enables the integration of different modes of transportation among PCJIC staff.

The strategy evaluated in this case study was called “CarPoli” or Share Your Car. The results revealed benefits and helped determine the contributions to certain SDGs at the corporate level, as well as support decision-making focused on emission reductions. This culminated in the development of guidelines for the PCJIC emissions reduction plan, with an emphasis on sustainable mobility. The knowledge gained not only contributes to compliance with regulatory frameworks but also opens the door for replicating these learnings in other institutions.

Palabras clave: *Emissions, Sustainable mobility, Staff o Employees, Corporate mobility strategies)*

1. Introducción

El cambio climático representa un desafío global impulsado por el incremento de gases de efecto invernadero (GEI) debido especialmente a actividades humanas en particular, desde la revolución industrial IDEAM (2006). Este fenómeno ha provocado un aumento significativo en la temperatura media mundial, alcanzando en 2024 un récord de 1.45 °C por encima de los niveles preindustriales. La industrialización, el uso de combustibles fósiles y la transformación del uso del suelo han sido factores clave en este deterioro ambiental, con consecuencias directas en el equilibrio climático y la calidad del aire. Además, la contaminación atmosférica derivada de estos procesos representa una amenaza para la salud pública, causando millones de muertes prematuras cada año WMO (2024).

Ante esta crisis, la comunidad internacional ha impulsado acuerdos y estrategias para mitigar el impacto del cambio climático. El Acuerdo de París de 2015 estableció metas ambiciosas para reducir las emisiones de GEI en un 45 % para 2030 y alcanzar la neutralidad climática en 2050, con el objetivo de limitar el calentamiento global a 1.5°C. Adicionalmente, diversas organizaciones internacionales han implementado compromisos para operar de manera climáticamente neutra. Sin embargo, el éxito de estas iniciativas depende del cumplimiento efectivo de las políticas ambientales y la cooperación global para transformar los modelos de producción y consumo hacia alternativas sostenibles ONU (2018).

A nivel nacional, Colombia ha intensificado su compromiso climático alineado con el Acuerdo de París mediante su Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC, por sus siglas en

inglés), en la cual se plantea una reducción del 51 % de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) para el año 2030 y alcanzar la carbono-neutralidad al 2050. Para ello, el país ha implementado políticas como el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC), la Estrategia Colombiana de Desarrollo Bajo en Carbono y la Ley de Acción Climática (Ley 2169 de 2021), que establecen un marco legal para la acción climática y responsabilidades para el sector público y privado. Sin embargo, a pesar de la vinculación de casi 500 organizaciones nacionales con el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, persisten desafíos significativos a nivel nacional y corporativo en la cuantificación, monitoreo y reducción de GEI, los cuales se relacionan con la deforestación, la dependencia de combustibles fósiles, que conllevan al aumento de las emisiones, la limitada implementación de las políticas ambientales, entre otros factores [MADS \(2021\)](#).

Según el último Inventario nacional de GEI (INGEI), para el año 2021 desde el módulo energía se emitieron 91.610,55 kt CO₂eq donde el 92,06 % de las emisiones corresponden a las actividades asociadas a la quema de combustibles, de las cuales el sub-sector transporte emitió el 46,03 %, es decir, 42.168,34 kt CO₂eq aproximadamente derivados de operaciones ligadas a la quema de combustibles vehiculares a nivel nacional [IDEAM, Minambiente, PNUD, y Natura \(2024\)](#). El sub-sector transporte ha tenido una tendencia ascendente desde el año 1990 con efectos más marcados desde el 2003, registrándose un aumento progresivo en las emisiones del periodo 2016-2019, alcanzando 37.795,75 ktCO₂eq en el 2019. Sin embargo, en 2021 fue el año donde se alcanzaron las mayores emisiones históricas con 40.317,84 ktCO₂eq. [IDEAM \(2024\)](#). Adicionalmente, con respecto a los contaminantes criterio, el sector transporte es el principal emisor, representando el 80 % de las emisiones de material particulado fino menor a 2.5 micras - PM_{2.5} y menor a 10 micras - PM₁₀; el 20 % restante está representado por las fuentes fijas [IDEAM \(2024\)](#).

Estos datos evidencian el gran impacto que tiene el sector transporte en la calidad del aire y en el cumplimiento de las metas ambientales nacionales, siendo el sector energía, fuertemente influenciado por el sub-sector transporte, el segundo sector más representativo en términos de emisiones de GEI y el más influyente en las emisiones de contaminantes criterio (PM₁₀ y PM_{2.5}), asicadas con problemas de salud a nivel respiratorio y cardiovascular.

El Valle de Aburrá, no es ajena a esta situación, según lo cita el inventario metropolitano de GEI, el sub-sector transporte emitió 2.917.338 tCO₂eq en 2021, lo cual representa un 3.18 % del total de las emisiones nacionales [AMVA \(2023\)](#). De igual modo, esta región enfrenta una situación crítica de contaminación atmosférica dada la condición de cuenca atmosférica [AMVA \(2018\)](#), influenciada entre otros factores, por la condiciones meteorológicas y topográficas, la magnitud de las emisiones atmosféricas y las condiciones de movilidad urbana. En este contexto, la región se ve sometida a la declaración de episodios críticos de calidad del aire en dos periodos de transición climática al año, situación que conlleva a la toma de decisiones para proteger la salud de la población. Entre estas decisiones se resalta la importancia de disminuir las emisiones atmosféricas que puedan causar daño a la salud de la población, no obstante, resulta importante contar con la información clara asociada a la cuantificación de dichas emisiones generadas como base para planear y ejecutar acciones de reducción y remoción.

Para contribuir a las metas de carbono neutralidad y a los compromisos climáticos, el PCJIC se adhirió en 2021 a un acuerdo de voluntades con el MADS con el objetivo de cuantificar sus emisiones de GEI y reportar sus acciones de reducción. Las emisiones estimadas de

GEI en la sede central del PCJIC representan un 6.31 % provenientes de fuentes directas y el resto distribuidas entre el uso de productos (63.6 %), energía adquirida (22.97 %) y transporte (7.2 %) [Yepes Palacio, Gomez Marin, Valderrama Gil, y Marín Chavarría \(2022\)](#). De igual manera, orientó sus esfuerzos en la actualización del plan Empresarial de Movilidad Sostenible - Plan MES - realizado en 2020 y en la evaluación de las emisiones atmosféricas asociadas a la movilidad de sus colaboradores. En el marco de este instrumento, se han desarrollado estrategias de movilidad sostenible, entre ellas la denominada Carpooling o vehículo compartido, para el PCJIC, llamado “Carpoli” con el fin de promover una cultura ambiental basada en la reducción de emisiones. Sin embargo, se identificó la necesidad de evaluar la efectividad de la implementación de esta estrategia y generar conocimiento valioso sobre la magnitud de las reducciones alcanzadas y su contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible, sirviendo así de base para la toma de decisiones.

En 2024 el PCJIC orientó sus esfuerzos hacia la actualización del Plan MES basado en la evaluación de las emisiones atmosféricas asociadas a la movilidad de sus colaboradores, así como a la optimización de la estrategia de movilidad sostenible Carpoli. Para ello, se implementó una aplicación tecnológica móvil que permitió estimar las emisiones generadas a partir de la integración de diversos modos de transporte utilizados por el personal.

El principal referente teórico asociado con la investigación, es el concepto de movilidad urbana sostenible, entendida como “El resultado de un conjunto de políticas de transporte y circulación que buscan proporcionar el acceso amplio y democrático al espacio urbano, a través de la priorización de los modos no motorizados y colectivos de transportes, de forma efectiva, socialmente inclusiva y ecológicamente sostenible, basado en las personas y no en los vehículos” [Boareto \(2003\)](#) citado por [Gibson, Jolly, Vilches, y Parra \(2011\)](#). El concepto, incorpora elementos teóricos significativos asociados a la contaminación atmosférica, la calidad del aire y la movilidad urbana, tales como: contaminantes criterio, material particulado, fuentes de emisión, procesos de combustión, efecto de invernadero, viajes origen – destino (O-D) y características de la movilidad sostenible incluyendo los planes empresariales. Igualmente, se tiene como referente normativo las resoluciones 1379 de 2017, 2036 de 2019, 0756 de 2023 y 1943 de 2024 expedidas por el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA), y alusivas a la implementación y seguimiento a los planes MES [AMVA \(2024\)](#).

El proyecto de investigación, liderado por el grupo GHYGAM, tuvo como objetivo generar información confiable y relevante para el análisis de las emisiones derivada del desplazamiento de los colaboradores del PCJIC, con el fin de fortalecer las condiciones ambientales institucionales. Este artículo presenta los resultados obtenidos en relación con las emisiones indirectas generadas por la movilidad del personal, y documenta los avances en la optimización de la estrategia corporativa “Carpoli” o Comparte tu carro en términos de los beneficios obtenidos para contribuir a la sostenibilidad.

2. Métodos y materiales

Se trata de una investigación aplicada de tipo mixto (cuantitativa y cualitativa), con un enfoque descriptivo-exploratorio, también incluyó elementos de investigación acción o investigación participativa y estudio de caso, en tanto que se involucró a los colaboradores en la

prueba de la estrategia y operación del aplicativo móvil para compartir el vehículo.

Para estimar las emisiones asociadas a la movilidad de colaboradores se siguió el siguiente procedimiento: Se partió de uso del software SIMV5 suministrado por la autoridad ambiental urbana (AMVA), a partir de este aplicativo, se implementaron 2 tipos de instrumentos, encuesta de sitio (para la recolección de datos alusivos a las características de la infraestructura y los empleados) y encuesta Origen Destino (O-D) de colaboradores (dirigida a los empleados). El software se basa en modelos de cálculo de emisiones per cápita e institucionales para el dióxido de carbono (CO_2) y el $PM_{2.5}$ en función de los modos de transporte, distancias recorridas, tiempos de viaje, entre otras variables. A partir del SIMV5 se estimó una muestra estadísticamente representativa de colaboradores de las sedes Poblado, Bello y Niquia, para la aplicación de encuestas O-D sobre los modos de desplazamiento al lugar de trabajo y viceversa. Dicha muestra fue de 242 empleados (de un total de 454), En la tabla 1 se relaciona la muestra de colaboradores con la cual se desarrolló el estudio.

Sede	# de personas a encuestar
Poblado	209
Bello	27
Niquia	6
Total	242

Tabla 1: Muestra estadística de colaboradores por sede del PCJIC

Finalmente, se aplicaron las encuestas de manera personalizada a través del aplicativo. La información obtenida fue procesada en el programa Power BI, a partir de los datos suministrados por los colaboradores. La optimización de la estrategia de movilidad sostenible Carpoli basada en la evaluación de la reducción de emisiones, se desarrolló en varias fases. La implementación tecnológica incluyó la integración de la plataforma "Try My Ride", en un aplicativo tecnológico especializado para los sistemas iOS y Android configurada exclusivamente para el dominio institucional @elpoli.edu.co, para compartir rutas de desplazamiento con un período de prueba de 4 meses (julio a octubre de 2024), el seguimiento y análisis mensual de datos, unido a un proceso de capacitación y registro de los usuarios.

Se analizaron los resultados en función de la participación de los colaboradores, emisiones evitadas y su impacto sobre los Objetivos de desarrollo sostenible.

Con base en los resultados arrojados por el instrumento SIMV5 para el Plan MES y la optimización de la estrategia, se abordó el diseño de lineamientos del Plan MES, teniendo en cuenta los objetivos, metas, población objeto y periodicidad de medición. Se definieron estrategias para fomentar la movilidad activa, el uso de transporte público, regular el uso del vehículo particular y los espacios de estacionamiento, reducir el número de viajes, flexibilidad horaria, promover cambios culturales de movilidad, sensibilización y capacitación, entre otros.

3. Conclusiones

- A partir del diagnóstico de movilidad al año 2024 del PJIC, se actualizaron las emisiones de CO_2 y $PM_{2.5}$ en coherencia con los modos de transporte de los colaboradores, los

tiempos de viaje y distancias recorridas, resultados importantes para la toma de decisiones. Se obtuvo una disminución significativa de CO_2 y $PM_{2,5}$ comparadas con el año base 2018 (primer plan MES institucional).

- El proceso de evaluación de la estrategia comparte tu carro “Carpoli” a través de una plataforma tecnológica Try My Ride, con uso para dispositivos móviles, permitió integrar diferentes modos de transporte y generar conciencia sobre prácticas de transporte sostenible. Los resultados demostraron un impacto positivo en los patrones de desplazamiento de la comunidad institucional, que pueden ser replicados en otras instituciones.
- La reducción de emisiones del desplazamiento de colaboradores del PCJIC, a partir de la implementación de la estrategia Carpoli generó impacto sobre los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2, 3, 5, 11, 12 y 13.
- Se propusieron estrategias de movilidad sostenible para ser integradas al Plan de reducción de emisiones a nivel institucional

4. Resultados

Los resultados arrojados por el software SIMV5, describen variables esenciales de un sistema de movilidad, los más relevantes se relacionan a continuación:

- Tiempos de viaje: Los tiempos de viaje en transporte público oscilan entre 80 y 90 minutos. No obstante, el tiempo promedio de desplazamiento es de 60 minutos, con posibilidad de reducirse mediante campañas de cultura ciudadana orientadas a promover la movilidad sostenible.

- Modos de transporte principales: El medio de transporte que siguen prefiriendo los colaboradores de la institución es el automóvil particular (27.2 %). Si a este porcentaje se suman los desplazamientos individuales en taxi (2.51 %) y en motocicleta (9.62 % en motocicletas de cuatro tiempos y 1.67 % en motocicletas de dos tiempos), el total asciende al 40.99 %. Por ello, es necesario reforzar las estrategias orientadas a desincentivar su uso individual y promover el transporte compartido. En orden descendente, le siguen los medios de transporte público (TP), destacándose principalmente el uso del Sistema Metro (25.1 %), seguido por el bus colectivo (10.04 %). Es fundamental que la institución promueva entre sus colaboradores el uso de estos sistemas y fortalezca las estrategias orientadas a incrementar su adopción. Finalmente, un 5.86 % de los colaboradores opta por la movilidad activa a pie, y un 0.84 % utiliza la bicicleta, lo que en conjunto representa apenas el 6.7 %. En este contexto, se hace evidente la importancia de promover y respaldar con mayor fuerza el uso de la bicicleta, en articulación con el sistema de bicicletas públicas “Encicla”, que opera en el Valle de Aburrá, como una estrategia clave para fortalecer las acciones climáticas. En la figura 1 se ilustra los datos que describen la Modalidad principal de transporte de los colaboradores del PCJIC.

- Lugares de Origen y Distancias recorridas (Km): En cuanto a los lugares de origen, el 56.3 % de los colaboradores reside en Medellín, el 13.8 % en Bello y el 9.2 % en Envigado. El porcentaje restante se distribuye entre los otros siete municipios del Valle de Aburrá.

Las personas que residen en zonas más alejadas del PCJIC pertenecen, en su mayoría, a los estratos 1, 2 y 3, y tienden a utilizar principalmente el transporte público y la motocicleta.

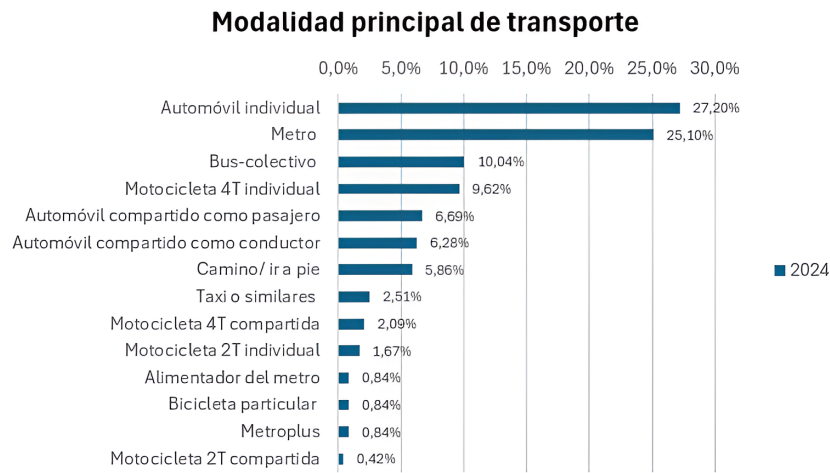


Figura 1: Modalidad principal de transporte utilizado por los colaboradores del PCJIC - 2024.

Para las distancias más largas, que afectan al 68.4 % de la población, la segunda alternativa más común es la combinación de medios de transporte público alternativos, como el sistema Metro, junto con el uso de vehículos compartidos.

Emisiones generadas: A continuación, se presentan los resultados generados por el aplicativo SIMV5 en relación con las emisiones asociadas a la movilidad institucional. Se registraron emisiones per cápita de 0.80 kg/persona de CO₂ y 0.20 g/persona de material particulado fino (PM2.5), lo que representa una disminución del 69.3 % y 37.8 %, respectivamente, en comparación con el año base 2018. Cabe aclarar que dicho año se toma como referencia por ser el último con datos representativos de movilidad antes del inicio de la pandemia por COVID-19.

De acuerdo con la meta de reducción establecida en la Resolución Metropolitana 756 de 2023, la cual establece una disminución del 20 % en las emisiones per cápita de CO₂ por cada dos años de ejecución de estrategias, se puede determinar que el PCJIC da cumpliendo a dicho objetivo.

La Figura 2 muestra los valores de emisiones de CO₂ y PM2.5 per cápita a nivel institucional derivadas del desplazamiento origen destino de los colaboradores, de la forma como el software arroja los resultados. En la tabla 2 se ilustra la evolución en el comportamiento de las emisiones para los años 2018 y 2024 que corresponden a primer Plan MES y su actualización respectivamente, notándose un aumento significativo de emisiones a nivel general y una disminución a nivel per cápita tanto en material particulado respirable como en el CO₂

A. KILOGRAMOS CO2 PERCÁPITA		B. GRAMOS PM 2,5 PERCÁPITA	
2.6316	2018	0.3250	2018
-0.6844	Dif (kg)	-0.0057	Dif (g)
1.9472 ▼	2024	0.3192 ▼	2024
-26.01%	Dif (%)	-1.77%	Dif (%)

Figura 2: Comparativo de resultados de CO_2 y $PM_{2,5}$ per cápita entre las vigencias 2018-2024 en el PCJIC. Fuente: SIMV5- AMVA..

Emisiones	Primer Plan MES	Seguimiento
	2018	2024
Toneladas CO2 Totales	0,3342	0,9522
Kg CO2 Per-capita	2,6316	1,9472
g de PM2.5 Totales	41,2739	156,1121
g de PM2.5 Per-capita	0,0325	0,319

Tabla 2: Emisiones derivadas de la movilidad de colaboradores del PCJIC 2018-2024

- Resultados de la optimización e la estrategia Carpoli: Por medio del software Try My ride, los resultados demostraron un impacto positivo en los patrones de desplazamiento de la comunidad institucional. Con una participación de 144 colaboradores y una tasa de activación de viajes del 75.7 %, se evidenció una transformación en los patrones de movilidad. Aunque el transporte público dominó inicialmente con 43 % de los registros, el uso del automóvil lideró las publicaciones efectivas con 53.1 %, mientras que la modalidad de caminantes incrementó notablemente su participación del 8 % inicial a 21.5 % en publicaciones efectivas.

Durante el piloto de implementación de la aplicación Try My Ride, se registraron 144 colaboradores del PCJIC, de los cuales 94 activaron correctamente la aplicación y la utilizaron de forma frecuente, publicando sus viajes y estableciendo conexiones que permitieron realizar desplazamientos compartidos. El análisis de efectividad de la aplicación se basa en este grupo de usuarios activos.

Es importante aclarar que en la figura 3 se presentan valores por modalidad de transporte que no suman exactamente las 94 personas activadas, debido a que algunos usuarios realizaron múltiples activaciones durante el periodo de implementación. No obstante, la aplicación contabiliza únicamente una activación por usuario. Tras una validación de los datos, se determinó que el número total de usuarios activados fue de 109.

Los colaboradores que hicieron uso de la conexión desde su dispositivo móvil, se ven representados por personas mayores de 45 años, seguidos en orden descendente, por adultos entre 31 y 45 años y finalmente, los menores de 30 años. En términos de género, las conexiones

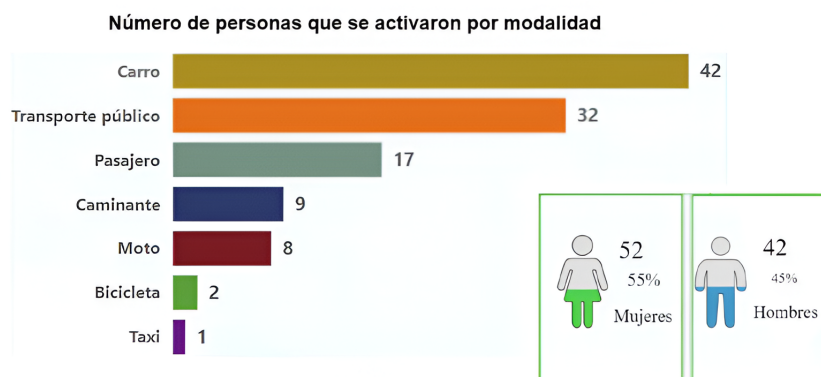


Figura 3: Número y género de personas que se activaron por modalidad de transporte en la aplicación Try My Ride. Fuente: Try My Ride.

mostraron una mayor participación femenina, lo que contrasta con los patrones generales de uso. En la tabla 3 se resumen los beneficios cuantificados.

Beneficio	Valor
Horas de tráfico evitadas	16
Ahorros económicos en transporte	\$618,000
Beneficios para la salud	85,000 calorías quemadas
Emisiones evitadas de CO ₂ eq.	143 kg

Tabla 3: Beneficios obtenidos en la optimización de la estrategia Carpoli

El análisis también reveló áreas de mejora, particularmente en la adopción de modalidades como bicicleta y scooter, que sólo alcanzaron un 0.7 % de participación.

Todo esto, evidencia el impacto sobre los siguientes ODS:

ODS 2 - Hambre cero (por el dinero ahorrado)

ODS 3 - Salud y bienestar (calorías quemadas en viajes a pie compartidos)

ODS 5 - Equidad de género (52 mujeres beneficiadas por el programa. El 93 % de los casos de acoso en el transporte le ocurren a mujeres)

ODS 13 Acción por el clima (143 Kg CO₂ eq. asociados a las emisiones evitadas)

ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles: reflejado en 16 horas de trabajo evitadas equivalentes a 1 día libre

ODS 12 - Producción y consumo responsable (mejor cultura de la movilidad que desfavorece el uso del vehículo individual).

- **Estrategias de movilidad proyectadas en el Plan MES:** Como respuesta, se definieron estrategias de movilidad sostenible alineadas con los resultados obtenidos, y diseñadas en función de los objetivos, metas, población objetivo y la periodicidad de medición. La estrategia de movilidad más adecuada para quienes residen a menos de 7 km del PCJIC —principalmente

personas de los estratos 4, 5 y 6— es la movilidad activa. Adicionalmente, para estos colaboradores, que en general cuentan con mayor capacidad para adquirir un vehículo propio, se identifican oportunidades para fomentar el uso del carpooling o vehículo compartido.

Las estrategias formuladas incluyeron: el impulso de la movilidad activa, la promoción del transporte público, la regulación del uso del vehículo particular y de los espacios de estacionamiento, así como la reducción del número de desplazamientos, mayor flexibilidad horaria y se implementaron acciones de sensibilización y capacitación para promover un cambio cultural en los hábitos de movilidad. Dichas estrategias fueron reportadas a la Autoridad ambiental urbana AMVA, para dar cumplimiento a compromisos ambientales regionales.

Referencias

- AMVA. (2018). ACUERDO METROPOLITANO N° 04 de 2018 . *Metropol.gov.co*. Descargado de <https://www.metropol.gov.co/ambiental/calidad-del-aire/Documents/POECA/Acuerdo-Metropolitano-04-de-2018-POECA.pdf>
- AMVA. (2023). INVENTARIO DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO DEL VALLE DE ABURRÁ PERIODO 2016-2021. *Metropol.gov.co*. Descargado de https://www.metropol.gov.co/ambiental/calidad-del-aire/Documents/Inventario-de-emisiones/Inventario%20GEI%202016-2021_VF_4Sectores.pdf
- AMVA. (2024). Resolución metropolitana 1943 de 2024. *Metropol.gov.co*. Descargado de https://www.metropol.gov.co/ResolucionesMetropolitanas/Resolucion_2024_001943.pdf
- Boareto, R. (2003). A mobilidade urbana sustentável. *ANTP*. Descargado de https://files-server.antp.org.br/_5dotSystem/download/dcmdocument/2013/01/10/15fbd5eb-f6f4-4d95-b4c4-6aad9c1d7881.pdf
- Gibson, C. D., Jolly, J.-F., Vilches, A. M., y Parra, F. R. (2011). Algunas reflexiones sobre la movilidad urbana en Colombia desde la perspectiva del desarrollo humano. *Papel Político*. Descargado de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0122-44092011000200007
- IDEAM. (2006). IDEAM. *Cambio Climático IDEAM*. Descargado de <http://www.ideam.gov.co/web/atencion-y-participacion-ciudadana/cambio-climatico>
- IDEAM. (2024). Inventario Nacional de Emisiones y Absorciones Atmosféricas de Colombia. Gases de Efecto Invernadero (1990- 2021), Contaminantes Criterio y Carbono Negro (2010-2021). *Cambio Climático IDEAM*. Descargado de https://www.andi.com.co/Uploads/1.%20Inventario_Nacional_de_Emisiones_y_Absorciones_Atmosf%C3%A9ricas_de_Colombia%201.pdf
- IDEAM, Minambiente, PNUD, y Natura, F. (2024). Anexo 1: Documento del Inventario Nacional de Emisiones y Absorciones Atmosféricas de Colombia. Gases de efecto invernadero (1990-2021). Contaminantes criterio y carbono negro (2010-2021). Primer informe bienal de transparencia (BTR 1) de Colombia. *Boletín IDEAM*. Descargado de https://unfccc.int/sites/default/files/resource/2.%20Anexo_NID_Colombia.pdf
- MADS. (2021). Programa Nacional de Carbono Neutralidad y Resiliencia Climática. *Carbono Neutral Minambiente*. Descargado de <https://unfccc.int/es/news/>

[las-principales-organizaciones-internacionales-se-comprometen-en-la-cop24-con-la-accion-climatica](#)

ONU. (2018). Las principales organizaciones internacionales se comprometen en la COP24 con la acción climática. *News ONU*. Descargado de <https://unfccc.int/es/news/las-principales-organizaciones-internacionales-se-comprometen-en-la-cop24-con-la-accion-climatica>

WMO. (2024). WMO Air Quality and Climate Bulletin. *Geneva*, 12. Descargado de <https://library.wmo.int/es/records/item/69006-no-4-september-2024>

Yepes Palacio, D. L., Gomez Marin, M., Valderrama Gil, E., y Marín Chavarría, M. (2022). VALIDACIÓN DE DATOS PROGRAMA CARBONO NEUTRAL FASE 1. POLITÉCNICO COLOMBIANO Jaime Isaza Cadavid SEDE Poblado Medellín. Medellín. *Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid*.

Análisis multitemporal de dinámica hidráulica de cuerpos de agua en el bajo Cauca Antioqueño

Valentina Cortés-Arango¹, Juan Andrés Jaramillo-Pineda², Camilo Echeverri-Idarraga³, Juan Carlos Valdés-Quintero⁴, Jorge Ernesto Espinosa-Oviedo⁵, Sandra Mateus-Santiago⁶, Jean Pierre Díaz-Paz⁷, Juan Camilo Parra-Toro⁸, Henry Omar Sarmiento-Maldonado⁹, Silvana Bolaños-Chavarría¹⁰, Carolina González-Morales¹¹, César Aníbal Olmos-Severiche¹², Rubén Darío Vásquez-Salazar¹³,

Resumen

Este trabajo presenta una metodología para el procesamiento y análisis de imágenes SAR enfocada en la detección y monitoreo de cuerpos de agua. Se aplicó un autoencoder profundo para eliminar el ruido speckle, mejorando la calidad visual de las imágenes y facilitando su clasificación. Posteriormente, se utilizó el método de Otsu para segmentar las zonas con presencia de agua, logrando una separación efectiva respecto a otras coberturas como vegetación y áreas urbanas. A partir de una serie de 12 imágenes mensuales clasificadas, se realizó una fusión multitemporal que permitió generar mapas de probabilidad de presencia de agua. Estos mapas identificaron zonas con agua permanente, intermitente o ausente, proporcionando información clave para el monitoreo ambiental. Los resultados muestran que la integración de técnicas de aprendizaje profundo con análisis multitemporal ofrece una solución robusta y precisa para el estudio dinámico de cuerpos de agua mediante imágenes SAR.

Abstract

This work presents a methodology for processing and analyzing SAR images focused on the detection and monitoring of water bodies. A deep autoencoder was applied to remove speckle noise, improving the visual quality of the images and facilitating classification. Subsequently, the Otsu method was used to segment areas with water presence, achieving effective separation from other land covers such as vegetation and urban areas. Based on a series of 12 monthly classified images, a multitemporal fusion

¹ valentina_cortes91211@elpoli.edu.co - Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid

² juan_jaramillo91201@elpoli.edu.co - Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid

³ camilo_echeverri95202@elpoli.edu.co - Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid

⁴ jcvaldes@elpoli.edu.co - Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid

⁵ jeespinosa@elpoli.edu.co - Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid

⁶ spmateus@elpoli.edu.co - Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid

⁷ jpdiaz@elpoli.edu.co - Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid

⁸ jcparra@elpoli.edu.co - Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid

⁹ hosarmiento@elpoli.edu.co - Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid

¹⁰ sbolanos@elpoli.edu.co - Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid

¹¹ cgonzalezm@elpoli.edu.co - Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid

¹² cesarolmos@elpoli.edu.co - Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid

¹³ rdvasquez@elpoli.edu.co - Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid

was performed to generate probability maps of water presence. These maps identified areas with permanent, intermittent, or absent water, providing key information for environmental monitoring. The results show that integrating deep learning techniques with multitemporal analysis offers a robust and accurate solution for the dynamic study of water bodies using SAR imagery.

Palabras clave: Teledetección, Radar de Apertura Sintética, Inteligencia Artificial, Análisis Multitemporal, Autoencoder

1. Introducción

El Bajo Cauca enfrenta graves problemas ambientales y de saneamiento básico que aumentan los índices de mortalidad y morbilidad. La disposición inadecuada de residuos contamina el agua y el aire, exacerbando la pobreza y la miseria, especialmente debido a la explotación minera. La minería en esta región se desarrolla de manera indiscriminada, sin ningún control o supervisión que prevenga el deterioro o los impactos ambientales negativos (Argota, 201724). Al existir pocas zonas en “etapa de exploración”, las personas desarrollan su labor de manera artesanal lo que contribuye a deteriorar zonas que en algunas ocasiones no poseen disponibilidad del mineral y no son reforestadas posteriormente (Avila, 2016). La deforestación de las zonas mineras del Bajo Cauca es una consecuencia muy visible de la presión antrópica que se manifiesta en la zona, y solo en algunos casos puntuales se ha evidenciado reforestación de zonas deforestadas, fruto de proyectos que buscan revegetalizar estas zonas degradadas o procesos de transición natural luego del abandono de las locaciones mineras.

Al estar ubicado en el trópico, esta región tiene una alta nubosidad (IDEAM, 2023), afectando con ello la posibilidad de monitorearla con sensores pasivos o imágenes multiespectrales. Por otra parte, los Satélites de Apertura Sintética (SAR) son sensores con una tecnología activa que permite realizar observaciones y mediciones de la superficie terrestre y cuerpos de agua a pesar de las adversas condiciones climáticas y ambientales, como neblina, nubes y contaminación atmosférica (Zhang et al., 2020; Prudente et al., 2020; Rabiei-Dastjerdi y Homayouni, 2022). Surge así entonces la necesidad de definir una metodología que permita contar con datos frecuentes, periódicos y de adecuada resolución, que permita hacer un análisis multitemporal de secuencias de imágenes capturadas en la misma región de interés, y con ello poder analizar las implicaciones de los impactos ambientales a partir de la detección de cambios en cobertura vegetal y cuerpos de agua a partir de imágenes SAR.

Este documento está estructurado de la siguiente manera. En el Capítulo 2 se presenta la metodología y los materiales a utilizar en el análisis. En el Capítulo 3 se presentan los resultados obtenidos y el análisis de los mismos. Finalmente, en el Capítulo 4 se presentan algunas conclusiones y trabajo futuro.

2. Métodos y materiales

La región de interés Antioqueño se sitúa al norte del departamento de Antioquia, en las últimas estribaciones de la Cordillera Central. Con una extensión de 8.485 km², comprende seis municipios situados entre las serranías de Ayapel, en la cordillera Occidental, y San Lucas, en

la cordillera Central: Cáceres, Tarazá, Caucaasia, Zaragoza, El Bagre y Nechí. La mayor parte del territorio oscila entre los 30 y 1.000m sobre el nivel del mar. Los municipios de Cáceres, Caucaasia, El Bagre, Nechí y Zaragoza se encuentran en una planicie aluvial bañada por los ríos Cauca, Man, Nechí, Cacerí y numerosos afluentes más pequeños. Esta vasta llanura, rodeada de montañas, alberga extensas áreas cenagosas que cubren más de 40.000 hectáreas, conectadas con los ríos a través de caños, formando complejos sistemas de lagos, pozas, pantanos y playones que retienen el agua durante las crecientes y la liberan gradualmente durante los períodos de sequía. Este sistema cenagoso es sin duda una de las principales riquezas naturales del Bajo Cauca, donde se desarrolla una amplia diversidad biológica.

La región de interés a estudiar se centrará en la confluencia de los ríos Cauca y Nechí, como se muestra en la Figura 1.

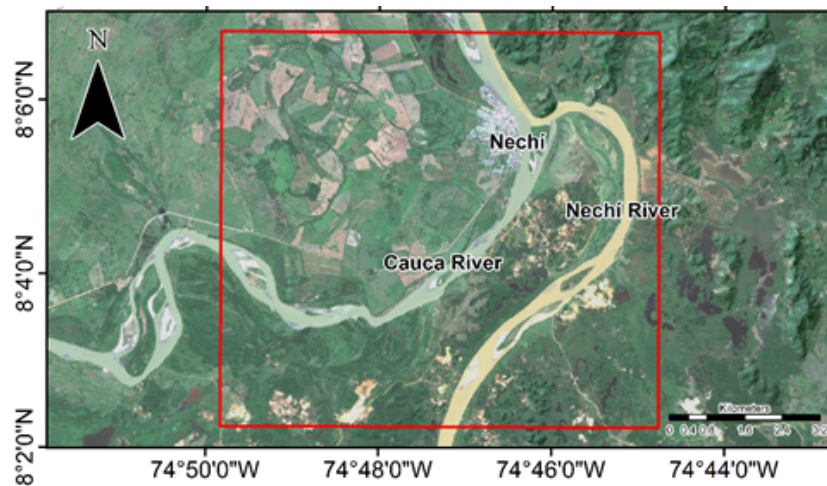


Figura 1: Región de interés de confluencia de los ríos Nechí y Cauca en Antioquia (Colombia).

2.1. Imágenes satelitales SAR

El radar de apertura sintética (SAR) es un tipo de recopilación activa de datos en la que un sensor tipo radar produce su propia energía y luego recibe o captura la cantidad de esa energía reflejada después de interactuar con la Tierra. Si bien las imágenes ópticas son similares a la interpretación de una fotografía, los datos SAR requieren una forma diferente de analizar, ya que la señal responde a las características de la superficie, como la estructura y la humedad (NASA, 2025). Estos radares emiten señales en diferentes longitudes de onda, las cuales son útiles para diferentes aplicaciones. No todas las plataformas satelitales poseen todas las longitudes de onda, y depende de los sensores y antenas que hayan incorporado en su estructura.

La misión Sentinel-1, la cual se usa como fuente de datos e imágenes en este estudio, está compuesta por una constelación de dos satélites —Sentinel-1A lanzado en 2014 y Sentinel-1B en 2016— proporciona imágenes continuas y fiables de la superficie terrestre. Aunque el

Sentinel-1B fue retirado del servicio en agosto de 2022 debido a fallos técnicos, la misión será reforzada con el lanzamiento del Sentinel-1C el 5 de diciembre de 2025 (Torres, Davidson, y Geudtner, 2020; ESA, 2025b), y del Sentinel-1D en la segunda mitad de 2025 (ESA, 2025a). El sistema de Radar de Apertura Sintética (SAR) de la misión recopila escenas detectadas en rango terrestre (GRD), las cuales se someten a un procesamiento exhaustivo mediante la Plataforma de Aplicaciones Sentinel (SNAP) (ESA, 2025c). Este procesamiento incluye la calibración radiométrica, la corrección del terreno (ortorrectificación) y otros pasos de preprocesamiento esenciales para garantizar la precisión y utilidad de los datos (Kuntla, 2021; Google Inc., 2025; Navacchi et al., 2023). El instrumento SAR opera en la banda C a una frecuencia de 5.405 GHz y utiliza polarización dual (VV y VH) para capturar información detallada de la superficie. Las especificaciones técnicas clave de las imágenes Sentinel-1 incluyen parámetros de misión, características del sensor y niveles de procesamiento.

2.2. Método de descarga y análisis de imágenes

La descarga de imágenes de Sentinel-1 se debe realizar de la plataforma de Copernicus, el cual es el programa de observación de la tierra de la Unión Europea. Para el acceso a dichos repositorios se utiliza Google Earth Engine (GEE) integrado con una interface de programación de aplicaciones (API, por sus siglas en inglés de Application Programming Interface) con el lenguaje de programación Python. Se sigue la metodología descrita en la Figura 2 para la descarga, preprocesamiento, procesamiento y análisis de imágenes. El preprocesamiento de reescalización y registro se realiza también con el apoyo de GEE. El filtrado se realiza con un autoencoder utilizando una estructura de aprendizaje profundo (Vásquez-Salazar, Cardona-Mesa, Gómez, y Travieso-González, 2024), la clasificación con el método Otsu y el cálculo del mapa de probabilidad con una operación de promedio sobre todas las 12 imágenes clasificadas de un año.

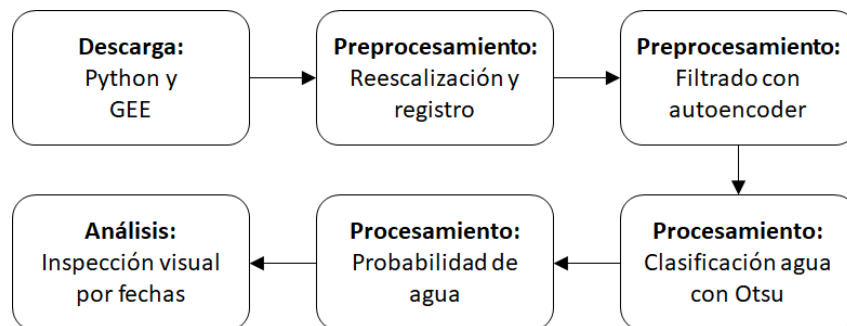


Figura 2: Método de descarga y análisis de imágenes.

3. Resultados y análisis

Se procedió a la descarga sistemática de imágenes satelitales, seleccionando una imagen representativa para cada mes, correspondientes al periodo comprendido entre los años 2017

y 2024. Esta selección temporal tiene como propósito fundamental la captura periódica y continua de la dinámica hidrológica de los cuerpos de agua presentes en la región de estudio. Esta estrategia responde a la necesidad de superar las limitaciones inherentes al uso de sensores ópticos, los cuales presentan una disponibilidad restringida debido a condiciones atmosféricas como la nubosidad, lo que impide garantizar una cobertura mensual constante.

En este contexto, se optó por el empleo de imágenes de radar de apertura sintética (SAR) en polarización VV, las cuales poseen la capacidad de adquisición independiente de las condiciones meteorológicas y de iluminación. Para cada una de las imágenes mensuales recopiladas, se implementó la metodología descrita en la Figura 2, aplicándola de manera individual a cada mes y a cada año dentro del intervalo de estudio. Los productos resultantes de este procedimiento se presentan en la Figura 3, donde se visualiza la evolución espacio-temporal de los cuerpos de agua en la zona de interés.

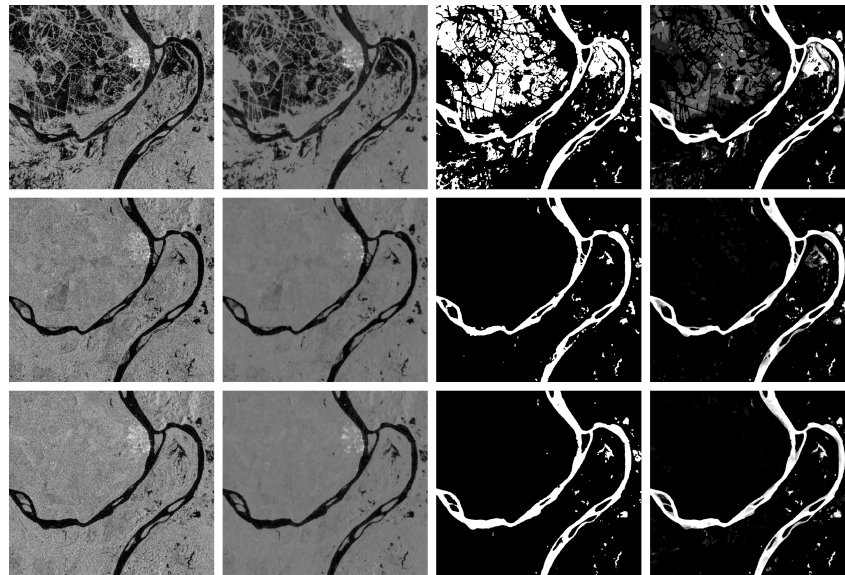


Figura 3: Resultados del análisis de imágenes. De arriba a abajo: 2017, 2020 y 2024. De izquierda a derecha: SAR VV, filtrada, clasificada y mapa de probabilidad.

Las imágenes SAR originales Figura 3 columna 1 poseen ruido speckle que dificulta las posteriores tareas de procesamiento e interpretación. Por ello, un filtro con un autoencoder con estructura de aprendizaje profundo para eliminar este tipo de efectos indeseados, como se aprecia en la columna 2. Dicho filtrado facilitó las tareas de clasificación, generando imágenes limpias. Particularmente el clasificador, usando el método Otsu (columna 3) generó una buena segmentación del agua respecto al otro tipo de vegetación, zonas urbanas y estructuras presentes en las imágenes.

El método propuesto de fusión multitemporal de imágenes clasificadas, el cual genera imágenes en escala de grises (Figura 3 columna 1), permite observar, a partir de 12 imágenes mensuales, el comportamiento dinámico del agua presente en la región de interés bajo análisis. En dichas imágenes se evidencian que no tuvieron agua en ninguna de las muestras analizadas

(zonas negras), otras con presencia en algunas de las muestras (zonas grises) y otras con agua permanente (zonas blancas), que corresponderían a probabilidades en el rango 0.0 a 1.0.

En la primera fila de la Figura 3, correspondiente a imágenes del año 2017, se evidencia una inundación al oeste de la confluencia, la cual se manifiesta como zonas negras en las imágenes SAR (columnas 1 y 2), y posteriormente como mancha blanca en la imagen clasificada (columna 3). En la imagen de mapa de probabilidades de agua (columna 4), la cual corresponde al promedio de imágenes clasificadas de todo el periodo 2017, se muestra que dicha inundación no fue persistente durante todo el periodo, ya que se evidencia como zonas grises mientras que el río se evidencia como zonas blancas, es decir, agua permanente en todo el periodo.

4. Conclusiones y trabajo futuro

El filtrado de las imágenes SAR utilizando un autoencoder profundo resultó efectivo para reducir el ruido speckle, mejorando la calidad de las imágenes y facilitando su interpretación visual. Esta mejora en la calidad es clave para optimizar los procesos posteriores de análisis, como la clasificación temática.

La aplicación del método de clasificación de Otsu sobre las imágenes filtradas permitió una segmentación clara entre cuerpos de agua y otras coberturas como vegetación, áreas urbanas y estructuras artificiales. Esto demuestra la utilidad del enfoque propuesto para identificar de manera precisa las zonas con presencia de agua en distintas condiciones.

La fusión multitemporal de imágenes clasificadas permitió generar mapas de probabilidad que evidencian el comportamiento dinámico del agua a lo largo del tiempo. Este análisis permitió distinguir zonas con agua permanente, intermitente o ausente, lo cual es fundamental para el monitoreo ambiental y la gestión de recursos hídricos.

El trabajo futuro se puede concentrar en desarrollar metodologías más complejas y elaboradas que permitan obtener datos cuantitativos y analizar automáticamente fenómenos que se presentan en este tipo de imágenes.

Referencias

- Argota, R. C. (201724). Desarrollo socio-económico regional: Impactos de la minería artesanal en el bajo cauca antioqueño. *Revista Internacional de Cooperación y Desarrollo*, 4, 46-62. doi: 10.21500/23825014.3116
- Avila, L. M. M. (2016). *Derechos de acceso en asuntos ambientales en colombia - hacia el desarrollo de una actividad minera respetuosa del entorno y las comunidades*. <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/871272c4-684e-432a-b151-e3312c06f9d9/content>. (Accessed on may 27 2025)
- ESA. (2025a). *Doble victoria para europa: Sentinel-1C y Vega-C surcan los cielos*. https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Spain/Doble_victoria_para_Europa_Sentinel-1C_y_Vega-C_surcan_los_cielos. (Accessed on may 23 2025)
- ESA. (2025b). *Sentinel-1*. https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-1. (Accessed on may 23 2025)

- ESA. (2025c). *SNAP - earth online*. <https://earth.esa.int/eogateway/tools/snap>. (Accessed on may 23 2025)
- Google Inc. (2025). *Sentinel-1 algorithms*. <https://developers.google.com/earth-engine/guides/sentinel1>. (Accessed on march 23 2025)
- IDEAM. (2023). *Atlas climatológico de colombia*. Descargado de <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/atlas> (Accessed on May 27 2025)
- Kuntla, S. (2021). An era of Sentinels in flood management: Potential of Sentinel-1, -2, and -3 satellites for effective flood management. *Open Geosciences*, 13, 1616 - 1642.
- NASA. (2025). *Synthetic Aperture Radar (SAR)*. [https://www.earthdata.nasa.gov/learn/earth-observation-data-basics/sar#:~:text=Synthetic%20aperture%20radar%20\(SAR\)%20is,after%20it%20interacts%20with%20Earth](https://www.earthdata.nasa.gov/learn/earth-observation-data-basics/sar#:~:text=Synthetic%20aperture%20radar%20(SAR)%20is,after%20it%20interacts%20with%20Earth). (Accessed on may 23 2025)
- Navacchi, C., Cao, S., Bauer-Marschallinger, B., Snoeij, P., Small, D., y Wagner, W. (2023). Utilising Sentinel-1's orbital stability for efficient pre-processing of radiometric terrain corrected gamma nought backscatter. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 23.
- Prudente, V. H. R., Martins, V. S., Vieira, D. C., e Silva, N. R. d. F., Adami, M., y Sanches, I. D. (2020). Limitations of cloud cover for optical remote sensing of agricultural areas across south america. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 20, 100414.
- Rabiei-Dastjerdi, H., y Homayouni, S. (2022). Urban land use and land cover change analysis using random forest classification of landsat time series. *Remote Sensing*, 14(11), 2654. doi: 10.3390/rs14112654
- Torres, R., Davidson, M., y Geudtner, D. (2020). Copernicus Sentinel mission at C- and L-band: Current status and future perspectives. *IGARSS 2020 - 2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 4055-4058.
- Vásquez-Salazar, R. D., Cardona-Mesa, A. A., Gómez, L., y Travieso-González, C. M. (2024). A new methodology for assessing SAR despeckling filters. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 21, 1-5.
- Zhang, R., Tang, X., You, S., Duan, K., Xiang, H., y Luo, H. (2020). A novel feature-level fusion framework using optical and sar remote sensing images for land use/land cover (lulc) classification in cloudy mountainous area. *Applied Sciences*, 10(8), 2928.

Pósteres

En esta sección se presentan los pósteres de los proyectos integradores del Programa de Ingeniería Informática, los cuales recogen el trabajo colaborativo y multidisciplinar de los estudiantes en la aplicación práctica de sus aprendizajes. Estos proyectos se caracterizan por aplicar los saberes técnicos para brindar soluciones a las necesidades reales en el campo de la informática. La modalidad de póster busca ofrecer una síntesis clara y visual de los principales objetivos, metodologías y resultados alcanzados, fomentando el intercambio académico y la socialización de experiencias significativas en el marco del Seminario de Ingeniería, Innovación y Tecnología.

LA REVOLUCIÓN DE LA TARJETA CÍVICA

Jhonnier Ortiz Lobo
Juan Pablo Restrepo Muñoz

Profesor Asesor: Jonathan Osorio Vasco

Proyecto Integrador

jhonnier_ortiz82211@elpoli.edu.co juan_restrepo82212@elpoli.edu.co

Resumen:

La App Cívica fue desarrollada como herramienta digital del Metro de Medellín para facilitar el acceso y recarga de la tarjeta de transporte. Sin embargo, aún existen barreras que impiden su adopción masiva. Este proyecto identifica los factores que afectan su uso e implementa estrategias para aumentar la adopción, con el fin de optimizar la experiencia del usuario y reducir la congestión en estaciones. Se usaron métodos mixtos, incluyendo encuestas y entrevistas, y se analizaron beneficios, percepciones y limitaciones del sistema actual.

Planteamiento del problema:

Aunque la App Cívica existe como una solución digital para recargar la tarjeta de transporte, muchos usuarios continúan usando los métodos tradicionales, generando congestión en estaciones y puntos de recarga. Las razones pueden incluir falta de confianza, desconocimiento o problemas de usabilidad. Por ello, surge la necesidad de analizar estos factores y diseñar estrategias que fomenten el uso digital.

Objetivo general:

Diseñar estrategias para incrementar la adopción de la App Cívica como medio principal para la recarga digital de la tarjeta, optimizando la experiencia del usuario y reduciendo la congestión en estaciones.

Metodología:

Se utilizó la metodología Design Thinking por su enfoque centrado en el usuario, lo cual permitió identificar las principales barreras en el uso de la App Cívica, como el desconocimiento, la desconfianza y problemas de usabilidad. A través de encuestas, entrevistas y pruebas con usuarios reales, se diseñaron y validaron propuestas como mejoras en la interfaz, tutoriales explicativos y estrategias de comunicación para fomentar su adopción.

Además, el desarrollo de la app se apoyó en tecnologías modernas como JavaScript, React Native y TypeScript para la creación de una interfaz móvil eficiente y adaptable, así como en Firebase para la autenticación de usuarios, almacenamiento de datos y gestión en tiempo real. Estas herramientas permitieron construir una aplicación robusta, segura y fácil de mantener, alineada con las necesidades detectadas durante el proceso de investigación con usuarios.

Resultados:

Se desarrolló una nueva versión de la aplicación Cívica Metro, enfocada en superar las barreras de desconocimiento, desconfianza y problemas de usabilidad detectadas en la app actual. La aplicación cuenta con múltiples métodos de acceso, como huella dactilar y contraseña, permite visualizar el saldo en tiempo real tras cada recarga o transacción, y amplía los medios de recarga a plataformas como PSE, Bancolombia, BBVA, Banco de Bogotá y Nequi. Además, integra funciones esenciales como registro de usuarios, gestión de datos personales, cambio de contraseña y transferencia de saldo entre cuentas, mejorando significativamente la experiencia y accesibilidad para los usuarios.

Tabla 1.

Aspecto	App Cívica (Metro de Medellín)	Nuestro prototipo de App Cívica
Acceso a la aplicación	Solo mediante usuario y contraseña	Huella dactilar, FaceID y usuario y contraseña
Visualización de saldo	Puede tardar en actualizarse	Saldo actualizado en tiempo real
Métodos de recarga	Solo a través de Cívica Pay	PSE, Bancolombia, BBVA, Banco de Bogotá, Nequi (más opciones)
Funcionalidades adicionales	Limitadas (Recarga y consulta de saldo)	Transferencia de saldo, edición de datos, cambio de clave, entre otras

Bibliografía:

- Gov.co. (2022). *Incentivos para el uso de la App Cívica*. Gobierno de Colombia.
- Gov.co. (s.f.). *Sistema Integrado de Transporte del Valle de Aburrá*. Gobierno de Colombia.
- Mintransporte. (2020). *Lineamientos técnicos del Sistema de Recaudo Centralizado*. Ministerio de Transporte de Colombia.



“UrbanIA”: Modelo predictivo para una planificación urbana más eficiente y sostenible en el municipio de Rionegro.

Proyecto de aula

Miguel Salazar, Carlos Gómez

Profesor Asesor: Jonathan Osorio Vasco

Proyecto Integrador

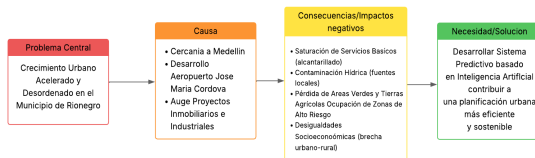
*Correos electrónicos: miguel_salazar82191@elpoli.edu.co,
carlos_gomez82211@elpoli.edu.co*

Resumen:

“UrbanIA” es un modelo predictivo para una planificación urbana más eficiente y sostenible en Rionegro, Antioquia. Este proyecto busca abordar el crecimiento urbano acelerado y desordenado que ha causado problemas como la saturación de servicios básicos y la pérdida de áreas verdes. El modelo utilizará inteligencia artificial y datos geoespaciales (DANE, PBOT, CORNARE) para analizar patrones históricos, proyectar escenarios futuros de expansión, y simular impactos en infraestructura y medio ambiente. La implementación se realizará mediante la metodología ágil Scrum. El objetivo es proporcionar una herramienta que permita a Rionegro un crecimiento más ordenado y equitativo, alineado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

Planteamiento del problema:

¿Un modelo predictivo basado en inteligencia artificial puede contribuir a una planificación urbana más eficiente y sostenible?



Objetivo general:

Desarrollar un sistema de predicción del crecimiento urbano en Rionegro, Antioquia, utilizando técnicas de inteligencia artificial y referencia geoespacial.

Metodología:

Se aplicará el marco de trabajo SCRUM.

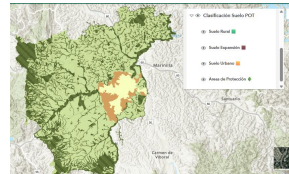
Participantes: Información proveniente de fuentes oficiales (DANE, CORNARE, PBOT) y actores locales.

Técnicas:

- Análisis de fuentes secundarias (estadísticas, normativa, artículos científicos).
- Utilización de plataforma Esri ArcGIS para el análisis y proyección de capas urbanísticas específicas (áreas protegidas, de expansión y urbanas).
- Algoritmos de IA para la simulación de escenarios de crecimiento urbano.

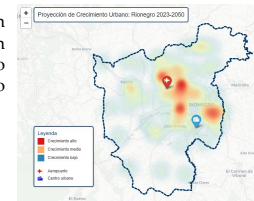
Resultados:

- Se han recopilado datos históricos relevantes de crecimiento urbano del municipio de Rionegro a partir de fuentes como el DANE, PBOT y CORNARE, incluyendo información demográfica, cartográfica y ambiental.
- Se ha iniciado el desarrollo de un modelo de predicción utilizando un algoritmo de regresión lineal, en conjunto con herramientas de análisis geoespacial.
- Se cuenta con una visualización inicial de escenarios de expansión urbana en un visor cartográfico, el cual permite observar posibles áreas de crecimiento futuro.



a. Identificación de zonas críticas y estratégicas para el desarrollo urbano.

b. Mapa predictivo con escenarios de expansión a corto, mediano y largo plazo, proyectando hasta el año 2050.



Conclusiones:

- El uso de inteligencia artificial y análisis geoespacial permite anticipar el crecimiento urbano y mejorar la toma de decisiones en la planificación territorial.
- Las visualizaciones interactivas facilitan la identificación de tendencias futuras, fortaleciendo estrategias sostenibles de ordenamiento del suelo.
- Este modelo puede replicarse en otros contextos, promoviendo un desarrollo urbano más equitativo, resiliente y alineado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Bibliografía:

DANE. (2018). Estadísticas de población.
CORNARE. (2015). Informes ambientales.
PBOT Rionegro. (2015). Plan Básico de Ordenamiento Territorial.
McKinsey Global Institute. (2021). Global Cities Report.
ONU. (2015). Objetivos de Desarrollo Sostenible.



Analiza las condiciones laborales de trabajadores informales del sector de alimentos y bebidas en el parque principal de San Antonio de Pereira (Rionegro, Antioquia).

Camila López Martínez
Ana María Pérez Zuluaga
Ximena Ospina Agudelo

Profesor Asesor: Jonathan Osorio-Vasco

Nombre del curso: Gestión del riesgo en las otras modalidades de trabajo

Correos electrónicos: camila_lopez11222@elpoli.edu.co, ana_perez11222@elpoli.edu.co, ximena_ospina11202@elpoli.edu.co

Resumen:

Este proyecto analiza las condiciones laborales de trabajadores informales del sector de alimentos y bebidas en el parque principal de San Antonio de Pereira (Rionegro, Antioquia). A través de 14 encuestas y observación directa, se exploran los riesgos laborales, la informalidad y las percepciones sobre la formalización.

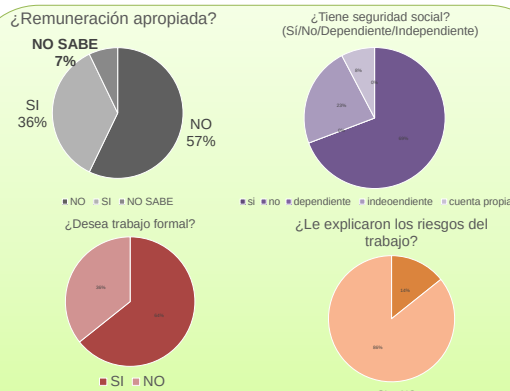
Los hallazgos muestran jornadas largas, escaso uso de protección personal y desconocimiento de normativas laborales. La informalidad es vista como una forma legítima de sustento, pese a sus precariedades.

El estudio busca aportar a la creación de estrategias educativas y de apoyo que dignifiquen el trabajo informal desde un enfoque socialmente comprometido

Resultados

- Condiciones laborales precarias: predominan la falta de contrato, afiliación a seguridad social, ingresos bajos y escasa capacitación en SST.
- Débil gestión en salud laboral: se evidencian deficiencias en el análisis de puestos de trabajo y en la realización de exámenes médicos.
- Interés en la formalización: muchos trabajadores desean acceder a un empleo formal, reflejando una necesidad de estabilidad y protección.
- Alta vulnerabilidad social: la informalidad requiere atención urgente mediante políticas públicas y programas de formalización laboral.

Tabla 1.



Planteamiento del problema:

En San Antonio de Pereira, la informalidad laboral en el sector de alimentos y bebidas es común y aceptada. Muchos trabajadores carecen de contratos, seguridad social y condiciones básicas, lo que los expone a riesgos físicos y vulnerabilidad social. Aunque precaria, esta forma de trabajo es vista como una alternativa frente a las barreras para formalizarse. La falta de políticas accesibles y apoyo institucional perpetúa esta situación. Por ello, es clave investigar y visibilizar el problema para proponer soluciones que dignifiquen el trabajo informal sin estigmatizarlo.

Objetivo general: Analizar las condiciones laborales, los riesgos en seguridad y salud en el trabajo (SST) y el nivel de conocimiento sobre trabajo formal e informal en trabajadores informales de micronegocios del sector de alimentos y bebidas en el parque principal de San Antonio de Pereira.

Metodología:

Tipo y diseño de investigación:

Estudio cualitativo descriptivo con apoyo cuantitativo, de diseño no experimental y corte transversal.

Población y muestra:

Trabajadores informales del sector de alimentos y bebidas en el parque principal de San Antonio de Pereira. Muestra intencionada de 14 personas seleccionadas por visibilidad y disponibilidad.

Recolección de datos:

Encuesta estructurada (preguntas abiertas y cerradas) y observación directa, enfocadas en condiciones laborales, riesgos en SST y conocimiento sobre formalidad laboral.

Análisis de datos:

Sistematización en matrices, análisis descriptivo y categorización cualitativa para identificar patrones, riesgos y percepciones comunes.

Conclusiones:

- Los trabajadores informales del sector alimentos laboran en condiciones precarias, con alta exposición a riesgos y sin acceso a protección social.
- Aunque reconocen los beneficios del trabajo formal, perciben la formalización como costosa, compleja o innecesaria.
- La informalidad se mantiene como forma de subsistencia ante la falta de apoyo institucional, lo que refuerza su vulnerabilidad laboral y social.

Bibliografías:

- 2018, Universidad de San Buenaventura Cali EBSCOhost Fuente Académica Premier Gale OneFile: Informe Académico, DOAJ Directory of Open Access Journals Gale Academic OneFile
- Pérez, A. M., Ospina, X., & López, C. (2025). Investigación trabajo informal: San Antonio de Pereira [Trabajo de campo no publicado]. Universidad (pji).
- 23 de enero de 2023, author_picture José G. Aguilar author_picture
- Ronal E. Mahecha | Docentes de la Facultad de Economía y Relaciones Internacionales de la Universidad Compió: José Valentín Hurtado M.
- Coordinación general: Maritza Rodríguez Reyes Proyecto TCP/COL/3202 "Estrategias de abastecimiento y distribución de alimentos a las ciudades de Bogotá, Medellín y Manizales" Supervisión técnica: Olívio Argenti (FAO/AGS) Bogotá, mayo de 2010



CARACTERIZACIÓN DE ESTUDIANTES DEL POLITÉCNICO COLOMBIANO JAIME ISAZA CADAVID

Angie Paola Rivera García, Laura Valeria Buitrago Guiral, Sandra Durley Lopera, Carolay Gonzales Amaris, Luis Alejandro Montiel, Leidy Tatiana Jiménez Gómez, Juan Agudelo

Profesor Asesor: Jonathan Osorio-Vasco

Nombre del curso: Gestión del riesgo en las otras modalidades de trabajo

Angie_rivera11201@elpoli.edu.co Laura_buitrago83192@elpoli.edu.co Sandra_lopera87222@elpoli.edu.co leidy_jimenez77222@elpoli.edu.co
luis_montiel77222@elpoli.edu.co juan_agudelo83151@elpoli.edu.co

Resumen:

Se lleva a cabo una encuesta con el propósito de evaluar las condiciones de los estudiantes, permitiendo su caracterización y la identificación del nivel de conocimiento que poseen sobre sus derechos.

Planteamiento del problema:

Caracterización de los estudiantes del Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid que realizan trabajos informales dentro del campus universitario, con el objetivo de identificar su perfil socioeconómico, motivaciones, tipo de actividades desempeñadas, ingresos generados y el impacto de estas labores en su bienestar y desempeño académico

Trabajo informal: sin regulación legal ni garantías laborales.

64,7% de los jóvenes colombianos trabajan informalmente (OIT, 2023).

Causa principal: necesidad económica.

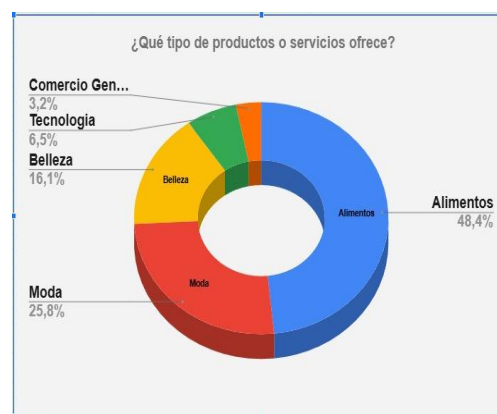
Objetivo general:

Analizar las condiciones laborales de los estudiantes del Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid que realizan trabajos informales dentro del campus universitario, con el propósito de identificar los factores que afectan su bienestar, seguridad, y cumplimiento de derechos laborales, así como evaluar el impacto de estas actividades en su desarrollo académico y calidad de vida.

Metodología:

Se recibieron por parte del docente, 3 encuestas aplicadas en diferentes investigaciones. Con base en esto se diseñó una encuesta que respondieron 32 estudiantes universitarios que realizan trabajos informales dentro de la universidad. Se recolectó información sobre las condiciones laborales, el tipo de actividades que desempeñan, sus motivaciones para trabajar, y el impacto que estas labores tienen en su rendimiento académico. La encuesta se aplicó de forma presencial.

Resultados:



- ✓ 70% desconoce sus derechos laborales
- ✓ 53.1% accede a Salud como beneficiario.
- ✓ Con un 46.9% % la cara es la parte del cuerpo mas expuesta al sol.
- ✓ El 50% gana entre 10.000 y 40.000 diarios y un 6.3% gana menos de 10.000

Conclusiones:

La venta de dulces dentro del campus universitario por parte de los estudiantes del Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid no representa una fuente de ingresos sostenible. En la mayoría de los casos, las ganancias obtenidas solo alcanzan para cubrir gastos menores como transporte o imprevistos, sin contribuir significativamente a su sustento o estabilidad económica. Esto evidencia que el trabajo informal dentro de la universidad es más una estrategia de apoyo puntual que una alternativa viable para cubrir necesidades a largo plazo.

Bibliografía:

- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6.ª ed.). McGraw-Hill
- López, M., & Rodríguez, A. (2021). *Impacto del trabajo informal en el rendimiento académico de los estudiantes universitarios*. Revista Latinoamericana de Educación y Trabajo, 12(3), 45-60. <https://doi.org/10.1234/rlet.2021.12.3>
- Jóvenes en el mercado laboral: entre la informalidad y la falta de oportunidades <https://www.ilo.org/es/resource/news/jovenes-entre-informalidad-y-falta-de-oportunidades>



La asignación manual de salones es común en algunas instituciones universitarias

Julian Garcia Arenas - Dairon Alonso Castañeda Marulanda

Profesor Asesor: Jonathan Osorio Vasco

Proyecto Integrador

julian_garcia82171@elpoli.edu.co - dairon_castaneda82201@elpoli.edu.co

Resumen:

Las instituciones universitarias enfrentan problemas en la asignación manual de salones, afectando la gestión académica. Este proyecto propone un sistema web automatizado, desarrollado con Angular, TypeScript, python y PostgreSQL, basado en datos simulados y metodologías ágiles, para optimizar el uso de aulas y reducir errores administrativos.

Planteamiento del problema:

En la sede Rionegro del politécnico Jaime Isaza Cadavid, la asignación de salones se realiza de manera manual	Los errores en la asignación generan conflictos entre grupos, salones y docentes.
¿Cómo se puede desarrollar un sistema automatizado que optimice la asignación de salones en la sede Rionegro del Politécnico Jaime Isaza Cadavid, considerando la reducción de tiempos administrativos, la eficiencia en el uso de los salones y la integración de la disponibilidad de aulas?	
La falta de integración entre áreas genera demoras y errores en la asignación de salones	Las reasignaciones de última hora afectan la planificación y el desarrollo de las clases

Objetivo general:

Desarrollar un sistema web automatizado para la asignación de salones en instituciones universitarias, optimizando la gestión de aulas mediante criterios de prioridad, cantidad de alumnos, horario y necesidades del profesor, con el fin de mejorar la eficiencia administrativa, reducir errores en la planificación y garantizar una distribución equitativa y adecuada de los recursos educativos.

Metodología:

Se empleó un enfoque de innovación apoyado en Design Thinking y metodologías ágiles. La información se obtuvo mediante entrevistas a personal administrativo y análisis de procesos actuales. Se trabajó con datos simulados y se definieron los requerimientos del sistema. Se diseñó una aplicación web con base de datos relacional. La validación se hizo mediante pruebas y modelado de asignaciones. El sistema busca optimizar la asignación de aulas con criterios claros y eficientes.

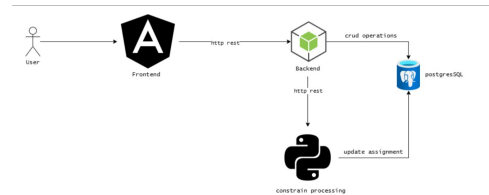


Figura 1: Arquitectura de microservicios. fuente: Elaboración propia.

Resultados:

Se desarrolló un sistema que asigna salones automáticamente según la disponibilidad de profesores, aulas y algunos detalles específicos de estas. Se diseñó el modelo entidad-relación, se implementó el frontend en Angular y el backend en NestJS y Python, conectando todo con PostgreSQL. El solver con OR-Tools ya funciona para asignaciones básicas, aunque no incluye aún todas las restricciones posibles. El enfoque fue validar la funcionalidad con criterios esenciales y datos simulados, avanzando hacia la automatización total.

Conclusiones:

- El sistema automatizado desarrollado demuestra que las soluciones tecnológicas pueden optimizar significativamente la gestión académica, adaptándose al contexto de instituciones universitarias..
- A pesar de las limitaciones en el acceso a datos reales, el uso de datos simulados basados en observación directa permitió diseñar una herramienta funcional, coherente y escalable.
- La combinación de metodologías ágiles y enfoque centrado en el usuario contribuyó a una solución efectiva, reduciendo la carga administrativa y mejorando la calidad del servicio educativo.

Bibliografía:

Politécnico Jaime Isaza Cadavid. (2024). El Poli cumple: Impulsamos el futuro con una inversión histórica en infraestructura en 2024. Recuperado el 25 de marzo de 2025, de <https://politecnicojic.edu.co/comunicados-y-boletines/5887-el-poli-cumple-impulsamos-el-futuro-con-una-inversion-historica-en-infraestructura-en-2024>

Ver video explicativo.

