

TECNOLOGÍA en marcha

Revista trimestral
Octubre – Diciembre 2026
Volumen 39 Nº 4
ISSN-E 2215-3241

Publicación y directorio en catálogos

latindex · redalyc.org · Dialnet · AmeliCA · SciELO · REDIB · DOAJ

Editorial Tecnológica de Costa Rica

TEC | Tecnológico de Costa Rica

TECNOLOGÍA en marcha

Comisión Editorial
Felipe Abarca Fedullo. Director de revista
Instituto Tecnológico de Costa Rica

Juan Antonio Aguilar Garib
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Universidad Autónoma de Nuevo León.
México

Carlos Andrés Arredondo Orozco
Facultad de Ingenierías
Universidad de Medellín. Colombia

Lars Köhler
Experimenteller Botanischer Garten
Georg-August-Universität Göttingen.
Alemania

Jorge Solano Jiménez
Instituto Costarricense del Cemento
y del Concreto

Edición técnica
Alexa Ramírez Vega

Revisión filológica
Esperanza Buitrago Poveda

Diseño gráfico
Felipe Abarca Fedullo

Diagramación
Alexa Ramírez Vega

Diseño de cubierta
Felipe Abarca Fedullo

Imagen de cubierta
https://www.pexels.com

Datos de catalogación en publicación

Tecnología en Marcha / Editorial Tecnológica de Costa Rica. - Vol. 39-4. Octubre-Diciembre, 2026 – Trimestral
ISSN-E 2215-3241

1. Ciencia y TecnologÍa –
Publicaciones periódicas CDD:600

Editorial Tecnológica de Costa Rica
TEC | Tecnológico de Costa Rica

Apdo 159-7050 Cartago, Costa Rica
Tel.:(506) 2550-2297, 2550-2618
Correo electrónico: editorial@itcr.ac.cr
Web: https://www.tec.ac.cr/editorial
http://revistas.tec.ac.cr/tec_marcha

Editorial Tecnológica de Costa Rica

TEC | Tecnológico de Costa Rica

La Editorial Tecnológica de Costa Rica es una dependencia especializada del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Desde su creación, en 1978, se ha dedicado a la edición y publicación de obras en ciencia y tecnología. Las obras que se han editado abarcan distintos ámbitos respondiendo a la orientación general de la Institución.

Hasta el momento se han editado obras que abarcan distintos campos del conocimiento científico-tecnológico y han constituido aportes para los diferentes sectores de la comunidad nacional e internacional.

La principal motivación de la Editorial es recoger y difundir los conocimientos relevantes en ciencia y tecnología, llevándolos a los sectores de la comunidad que los requieren.

La revista *Tecnología en Marcha* es publicada por la Editorial Tecnológica de Costa Rica, con periodicidad trimestral. Su principal temática es la difusión de resultados de investigación en áreas de Ingeniería. El contenido de la revista está dirigido a investigadores, especialistas, docentes y estudiantes universitarios de todo el mundo.

Publicación y directorio en catálogos

redalyc.org UAEM

SciELO

latindex

AmeliCA

Dialnet

DOAJ DIRECTORY OF OPEN ACCESS JOURNALS

Revista trimestral
Octubre-Diciembre, 2026
Volumen 39-4
ISSN-E: 2215-3241

TECNOLOGÍA en marcha

Contenidos

Identificación de índices de vegetación relacionados con componentes de rendimiento de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) mediante el uso de sensores multiespectrales

Identification of vegetation indices related to yield components of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) using multispectral sensors

Guillermo Vargas-Hernández, Eddison José Araya-Morales, Juan Carlos Hernández-Fonseca, Ignacio Mora-Cordero 3

Análisis y mitigación de la exposición electromagnética en cruces de infraestructura vial y líneas de transmisión de alta tensión: estudio aplicado de seguridad operacional

Analysis and Mitigation of Electromagnetic Exposure in Road Infrastructure Crossings with High-Voltage Transmission Lines: An Applied Study on Operational Safety

Juan David Losada-Losada, Darwin Fabio Marín-Yepez 20

Beneficios del cannabidiol proveniente de *Cannabis sativa* sobre enfermedades neurodegenerativas: una revisión sobre su implementación en la medicina moderna

Benefits of cannabidiol from *Cannabis sativa* on neurodegenerative illnesses: a review on its implementation in modern medicine

Alessandra María Le-Roy-Cáceres, Mattias Aguilera-Pogue, Sofía Montero-Yee, Lucía Ramírez-Hidalgo, Helena Soto-Pacheco 32

Assessment of heavy metal content in rivers and sediments: exploring relationships with land use and soil characteristics

Evaluación del contenido de metales pesados en ríos y sedimentos: exploración de las relaciones con el uso del suelo y las características del suelo

Guillermo Clavo-Brenes, Noemi Quirós-Bustos 41

Thermal processing and acidification: an undergraduate laboratory exercise

Procesamiento térmico y acidificación: un ejercicio de laboratorio de grado

José Adrián Chaves-Quesada, Óscar Acosta-Montoya 65

Aplicaciones de microorganismos en la biorremediación de suelos mineros contaminados con metales pesados

Microorganism application as a tool for bioremediation of mining soil contaminated with heavy metals

Gabriel Solís-Ramírez, María Jesús Ruiz-González, Jimena Arguedas-Castro, Juan David Bolaños-Acosta, Adrián Navarro-Quesada 77

Efecto de la suplementación con aditivos ricos en capsaicina en la producción de rumiantes: una revisión

Effect of capsaicin-rich additives on ruminant production: a review

Kenneth Matamoros-Corella, Mónica Madrigal-Valverde 91

Diseño y simulación computacional del prototipo de un espectrómetro RMN de campo bajo a base de arreglo Halbach de imanes permanentes de diseño modular para uso en el Instituto Tecnológico de Costa Rica

Design and Computational Simulation of a Modular Low-Field NMR Spectrometer Prototype Based on a Halbach Array of Permanent Magnets for Use at the Costa Rica Institute of Technology

Felipe Montero-Castillo, Joshuan Omier-Fernández, Jafet Ortiz-Valverde, Isaac F. Céspedes-Camacho 102

Modulación de la microbiota intestinal por el aceite de orégano: interacciones entre el carvacrol y el citocromo P450

Modulation of the intestinal microbiota by oregano oil: interactions between carvacrol and cytochrome P450

Brenda García-Carillo, Gabriela Vanessa Sandoval-Camacho, Melanie Arias-Solano, Milena de los Ángeles Pérez-Mejía, Antony Aron Castillo-Meléndez 123

Activación epigenética del gen SERPINA3 como estrategia compensatoria para la deficiencia de alfa-1 antitripsina: propuesta de un modelo con CRISPRa

Epigenetic activation of the SERPINA3 gene as a compensatory strategy for alpha-1 antitrypsin deficiency: proposal of a model with CRISPRa

Maciel Andrea Alfaro-Ulate, Luis Alfredo Barboza-Fallas, Sylvanna Samira Dodero-Ramírez, Ronald Steven Quesada-Monge, Josué David Rojas-Rojas, Laura Viviana Sanabria-Rodríguez 132

Caracterización multianalítica de suelos de Liberia (Guanacaste) para su uso potencial como material constructivo

Multianalytical characterization of soils from Liberia (Guanacaste) for their potential use as a construction material

Merylin Seas-Jiménez, Adrián Quesada-Martínez, Dominique Chang-Albizurez 143

Qanela: A framework proposal for designing portable quantum assembly languages across different quantum computing platforms

Qanela: Propuesta de un marco para el diseño de lenguajes ensamblado cuánticos portátiles a través de diferentes plataformas de computación cuántica

Isaac Arturo Vargas-Chacón, Johan Carvajal-Godínez, Ernesto Rivera-Alvarado 160

Identificación de índices de vegetación relacionados con componentes de rendimiento de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) mediante el uso de sensores multiespectrales

Identification of vegetation indices related to yield components of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) using multispectral sensors

Guillermo Vargas-Hernández[1], Eddison José Araya-Morales[2], Juan Carlos Hernández-Fonseca[3], Ignacio Mora-Cordero[4]

Fecha de recepción: 8 de diciembre, 2025
Fecha de aprobación: 17 de abril, 2026

Vargas-Hernández, G; Araya-Morales, E.J; Hernández-Fonseca, J.C; Mora-Cordero, I. Identificación de índices de vegetación relacionados con componentes de rendimiento de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) Mediante el uso de sensores multiespectrales . *Tecnología en Marcha*. Vol. 39 Nº 4. Octubre-Diciembre, 2026. Pág. 3-19.

https://doi.org/10.18845/tm.v39i4.8378

1 Estación Experimental Fabio Baudrit Moreno, Universidad de Costa Rica, Alajuela, Costa Rica.
guillermo.vargas@ucr.ac.cr
https://orcid.org/0000-0003-1410-3898
2 Instituto Nacional de Innovación y Transferencia de Tecnología Agropecuaria, Alajuela, Costa Rica.
earayam@inta.go.cr
https://orcid.org/0009-0001-0550-414X
3 Instituto Nacional de Innovación y Transferencia de Tecnología Agropecuaria, Alajuela, Costa Rica.
jchernandez@inta.go.cr
https://orcid.org/0000-0002-1915-3213
4 Universidad de Costa Rica, Alajuela, Costa Rica.
ignacio.moracordero@ucr.ac.cr
https://orcid.org/0009-0007-0925-0099

Palabras clave

Agricultura de precisión; fenotipado remoto; teledetección; modelos predictivos; drones; UAV.

Resumen

La producción de frijol en Costa Rica solo abastece un 20 % del consumo interno, lo que obliga a importar la restante demanda; esta situación justifica la necesidad de conocer con anticipación la capacidad productiva real de los agricultores locales para mejorar la planificación, el manejo agronómico y la regulación de las importaciones. Por ello, el objetivo de este estudio fue evaluar la utilización de datos multiespectrales e índices de vegetación para analizar su relación con los componentes de rendimiento en variedades de frijol cultivadas en distintas zonas productoras de Costa Rica, con el fin de identificar los índices de vegetación y el componente de rendimiento con mayor asociación espectral.

La investigación se desarrolló en tres sitios ubicados en Alajuela, Costa Rica. Mediante un sensor multiespectral aerotransportado se capturaron datos de reflectancia durante la etapa fenológica R5. Posteriormente, se cuantificaron los componentes de rendimiento por cada metro lineal de cultivo, tales como: peso de 100 granos, el número de vainas por metro, número de plantas, número de granos y peso total de granos. El número de vainas obtuvó la mayor asociación con las variables espectrales, por lo que fue identificado como el componente de rendimiento con mayor potencial para el análisis mediante teledetección. Los índices SR (Simple Ratio) y GCI (Green Chlorophyll Index) presentaron correlaciones superiores a 0,7 con esta variable, identificándose como los índices de vegetación con mayor asociación espectral durante la etapa R5 del cultivo.

Keywords

Precision agriculture; remote phenotyping; remote sensing; predictive models; drones; UAV.

Abstract

Bean production in Costa Rica supplies only 20 % of domestic consumption, requiring the importation of the remaining amount; this situation highlights the need to know in advance the actual productive capacity of local farmers to improve planning, agronomic management, and import regulation. Therefore, the objective of this study was to evaluate the use of multispectral data and vegetation indices to analyze their relationship with yield components in bean varieties cultivated in different production areas of Costa Rica and to identify the yield component with the greatest spectral association.

The research was conducted at three sites located in Alajuela, Costa Rica. Multispectral reflectance data were collected during the R5 phenological stage using an airborne multispectral sensor. Subsequently, yield components were quantified per meter of crop row, including 100-grain weight, number of pods per meter, number of plants, number of grains, and total grain weight. The number of pods showed the highest association with spectral variables and was therefore identified as the yield component with the greatest potential for analysis through remote sensing. The SR (Simple Ratio) and GCI (Green Chlorophyll Index) indices showed correlations greater than 0.7 with this variable, being identified as the vegetation indices with the highest spectral association during the R5 stage of the crop.

Introducción

El frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) es una leguminosa de la familia Fabaceae y tribu Phaseoleae, es utilizada ampliamente como sustento de poblaciones con bajos recursos en países en vías de desarrollo [1], como Costa Rica. El país no es autosuficiente en la producción de este cultivo, cuya área sembrada ha disminuido en los últimos años y solo abastece alrededor de un 20% del consumo [2]. En Latinoamérica, se ha fortalecido el desarrollo de este cultivo en varias líneas de investigación que van desde el mejoramiento genético hasta la teledetección, con el objetivo de mejorar la eficiencia en la producción de este grano [3], [4], [5]especially under increasingly challenging climate conditions. Data synthesis can aggregate data from individual trials to produce information that supports decision making in plant breeding programs, extension services, and of farmers. Data from on-farm trials using the novel approach of triadic comparison of technologies (tricot.

Es necesario que el productor nacional pueda contar con herramientas tecnológicas como la predicción de cosecha para mejorar los sistemas agrícolas y optimizar los procesos en la cadena de producción de alimentos [6], aumentando su competitividad con respecto a las empresas que importan el grano de otras latitudes para abastecer la demanda de la población nacional [7], [8].

La teledetección aplicada a la agricultura de precisión ha demostrado ser una herramienta tecnológica muy valiosa para el manejo de los sistemas de producción agrícola [9], donde se destaca el aporte de los índices de vegetación para el aumento en la precisión y disminución del tiempo de respuesta en el monitoreo de los cultivos [10]. La utilización de vehículos aéreos no tripulados y de sensores para la obtención de imágenes multiespectrales de los cultivos, representa una alternativa no destructiva valiosa para obtener información relacionada al estado fenológico de las plantas y estimar su rendimiento [11]sensors, and data processing while also introducing recent technological developments. Recently developed software and sensors greatly enhance the accessibility of UAV-based phenotyping, and a summary of recent research (publications 2019–2024. De acuerdo con Li et al. [12] las principales técnicas utilizadas incluyen el procesamiento de imágenes dentro del espectro visible rojo-verde-azul (RGB), espectroscopía de imágenes, imágenes 3D, térmicas y de fluorescencia.

Los índices de vegetación han sido ampliamente aprovechados para dar seguimiento al estado fenológico, vigor y rendimiento de los cultivos, así como el efecto que tiene el estrés biótico y abiótico sobre su desarrollo [11], [13]. Estos se han utilizado para estudiar las variables relacionadas con el desarrollo de los granos básicos debido a su importancia alimenticia [13]. En Brasil, Boechat et al. [14] estudiaron la huella espectral obtenida en plantas de frijol afectadas por moho blanco provocado por *Sclerotini sclerotiorum* mediante tres índices de vegetación: índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI) e índice de vegetación de diferencia normalizada verde (GNDVI). Y determinaron que únicamente el NDVI obtenido 71 días después de germinación tuvo buena correlación con el deterioro de las hojas provocado por la enfermedad.

En una investigación conducida en Argentina, Girón y Pagani [15] evaluaron el uso del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) como criterio para la delimitación de zonas de manejo en función de diferentes dosis de nitrógeno y de la variación espacial. Los investigadores concluyeron que este índice no presentó la sensibilidad necesaria para discriminar adecuadamente la variabilidad espacial de la producción como respuesta a la fertilización nitrogenada.

Trapp et al. [16] evaluaron el rendimiento de variedades de frijol altamente susceptibles y tolerantes a la sequía determinando el NDVI en dos etapas de llenado de la vaina (media y tardía). Se determinó que este índice mostró buena correlación con el rendimiento (kg. ha^{-1}) y

llenado de vainas para las variedades tolerantes bajo estrés hídrico, y se obtuvo una correlación significativa con ambas variables para las variedades susceptibles tanto en condiciones normales como de estrés hídrico.

Sankaran et al. [16] utilizaron GNDVI y área de dosel para evaluar la respuesta del frijol a la sequía y deficiencia de nitrógeno, en diferentes estaciones del año. Para todas las variedades analizadas, el GNDVI tuvo correlación significativa con el rendimiento del cultivo bajo condiciones de sequía. Además, se evidenció una alta correlación entre el valor de este índice de vegetación determinado a los 60 y 75 días después de siembra (DDS) con el contenido de nitrógeno en la hoja para todos los porcentajes evaluados.

Ranjan et al. [17], utilizaron una cámara multiespectral para evaluar 25 índices de vegetación en tres etapas fenológicas de acuerdo con su relación con el rendimiento del frijol bajo diferentes condiciones de manejo. Se encontró que los índices IPVI, TDVI, NLI y MNLI mostraron mejor correlación con el rendimiento y el efecto de las labores de manejo. Además, evidenciaron de otros índices como NDVI, RDVI, SAVI, MSAVI y OSAVI pueden proveer información complementaria a los anteriores.

El propósito de esta investigación fue identificar la mayor asociación de bandas multiespectrales e índices de vegetación con componentes de rendimiento del cultivo de frijol, obtenidos mediante sensores aerotransportados en condiciones de campo en Costa Rica.

Materiales y Métodos

Área de estudio

La recolección de datos para la investigación se realizó en tres zonas productoras de frijol de Costa Rica: Caño Negro (10,892015°, -84,786122°), Pavón de Los Chiles (10,837449°, -84,618770°) y la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno (EEAFBM), ubicada en La Garita de Alajuela (10,00805°, -84,266611°). El estudio incluyó la variedad Cabécar en Caño Negro, la variedad Matambú en Pavón de Los Chiles y en la EEAFBM las variedades Diquís y Nambí en el lote 15, y Cabécar y Nambí en el lote 32.

En la EEAFBM se trabajó en dos lotes experimentales, identificados como EEAFBM 15 y EEAFBM 32. El cultivo se estableció mediante siembra a espeque, colocando 15 semillas por metro lineal. En Caño Negro y El Pavón de Los Chiles, la siembra se realizó de forma mecanizada mediante una sembradora neumática de precisión marca Jumil de seis líneas, acoplada a un tractor. La distribución de las semillas se efectuó mediante un sistema de vacío generado por una turbina, el cual permitió la dosificación individual de las semillas a través de discos perforados. La densidad de siembra también correspondió a 15 semillas por metro lineal.

Una semana después de la siembra se aplicó una fuente fosfatada a razón de 180 kg ha^{-1} de la fórmula 10-30-10. Para el manejo de insectos se realizó la aplicación de un insecticida piretroide a una dosis de 1 mL L^{-1}. El control de malezas durante los primeros 30 días después de la siembra se efectuó mediante aplicaciones de Fomesafen a razón de 375 mL ha^{-1} y Fluazifop-butil a 1 L ha^{-1}. Para el manejo fitosanitario de enfermedades se realizaron aplicaciones alternadas de Carbendazim a una dosis de 10 mL L^{-1} y Azoxistrobina a 1 g L^{-1} durante el ciclo del cultivo.

Diseño de investigación

El diseño de la investigación fue de carácter observacional, ya que no se manipularon variables independientes ni se establecieron tratamientos experimentales.

Los vuelos fotogramétricos se realizaron durante el estado fenológico R5 (floración), entre 40 y 52 días antes de la cosecha [18].

Se realizaron los vuelos en condiciones de cielo despejado. Las imágenes fueron capturadas a una altitud promedio de 80 metros, con traslapes frontales y laterales del 80% entre capturas, lo que permitió obtener una resolución espacial aproximada de 3,8 a 4,0 cm. La velocidad de vuelo se estableció en 6 metros por segundo durante la captura de datos. Estos parámetros fueron configurados previo a las misiones de vuelo utilizando el software DJI Pilot.

Previo a cada uno de los vuelos se realizó la identificación y georreferenciación de puntos de control utilizando un GPS de alta precisión (Trimble Geo 7X) para rectificar las imágenes que fueron procesadas con el programa Pix4D para generar el ortomosaico de cada área monitoreada.

Los datos multiespectrales se obtuvieron mediante el sensor MicaSense Altum™ serie AL04 (MicaSense, Inc. Seattle, Washington, Estados Unidos) acoplado en un dron DJI Matrice 210 (Da-Jiang Innovations Science and Technology Co., Shenzhen, China). Este sensor registró valores digitales correspondientes a la banda azul (475 nm ± 32 nm), verde (560 nm ± 16,5 nm), rojo (668 nm ± 7 nm), borde rojo (717 nm ± 6 nm) e infrarrojo cercano (842 nm ± 28.5 nm), junto a registros en centikelvins de la banda térmica (infrarrojo de onda larga o LWIR) (11 µm ± 3 µm).

El resultado de cada vuelo consistió en conjuntos de imágenes crudas (sin procesar), en las cuales cada píxel representó una ubicación geográfica con números digitales asociados a cada banda.

El procedimiento de calibración se efectuó mediante la captura de imágenes de un panel de calibración proporcionado por MicaSense antes y después de cada misión. Dichos datos se expresaron como una firma espectral de reflectancia absoluta, con valores comprendidos entre 0 y 1, los cuales representan la proporción de la luz reflejada en el rango de 400 a 850 nm, con incrementos de 1 nm. Se emplearon cinco bandas en la recolección de datos, las cuales fueron corregidas utilizando el panel de calibración radiométrica.

La corrección se llevó a cabo junto con la rectificación y ensamblaje de las imágenes, utilizando el software Pix4Dmapper Versión 4.5.6 (Pix4D SA, 2023). Se utilizó el proceso predeterminado “Ag Multispectral” para generar ortomosaicos (tipo ráster) correspondientes a cada banda.

Con este procedimiento se generaron ortomosaicos de las zonas de estudio con los valores de las reflectancias espectrales correspondientes a las bandas azul, roja, verde, infrarrojo cercano (NIR, por sus siglas en inglés) y borde rojo (Red-Edge). Posteriormente, se calcularon índices de vegetación, entre ellos el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), el índice normalizado de diferencia verde-rojo (NGRDI), el cociente simple (SR), el índice de diferencia normalizada de borde rojo (NDRE), el índice de clorofila verde (GCI) y el índice de clorofila Red-Edge (CI Red-Edge) (ver Cuadro 1).

Cuadro 1. Índices de vegetación utilizados para la evaluación del cultivo de frijol.

Índice	Fórmula
Índice de Vegetación Diferencia Normalizada (NDVI)	$\frac{R_{NIR} - R_{ROJA}}{R_{NIR} + R_{ROJA}}$
Índice de Diferencia Verde Rojo Normalizado (NGRDI)	$\frac{R_{VERDE} - R_{ROJA}}{R_{VERDE} + R_{ROJA}}$
Cociente Simple (SR)	$\frac{R_{NIR}}{R_{ROJA}}$
Índice de Borde Rojo (NDRE)	$\frac{R_{NIR} - R_{BORDE\ ROJO}}{R_{NIR} + R_{BORDE\ ROJO}}$
Índice de Clorofila Verde (GCI)	$\frac{R_{NIR}}{R_{VERDE}} - 1$
Índice de Clorofila Red-Edge (CI Red-Edge)	$\frac{R_{NIR}}{R_{BORDE\ ROJO}} - 1$

Nota. La banda “NIR” representa la región del espectro electromagnético del infrarrojo cercano (*near-infrared*).

A partir de estos productos, se identificó patrones de variabilidad espacial del vigor del cultivo, y se utilizó como referencia principal el índice de vegetación NDRE debido a su sensibilidad a los contenidos de clorofila y a condiciones de nutrición [19]NDRE, GNDVI, and SAVI are widely applied to estimate vine vigor, canopy structure, and water status. Beyond agronomic traits, UAV-derived indices can inform grape composition, including sugar content (°Brix (Figura 1).

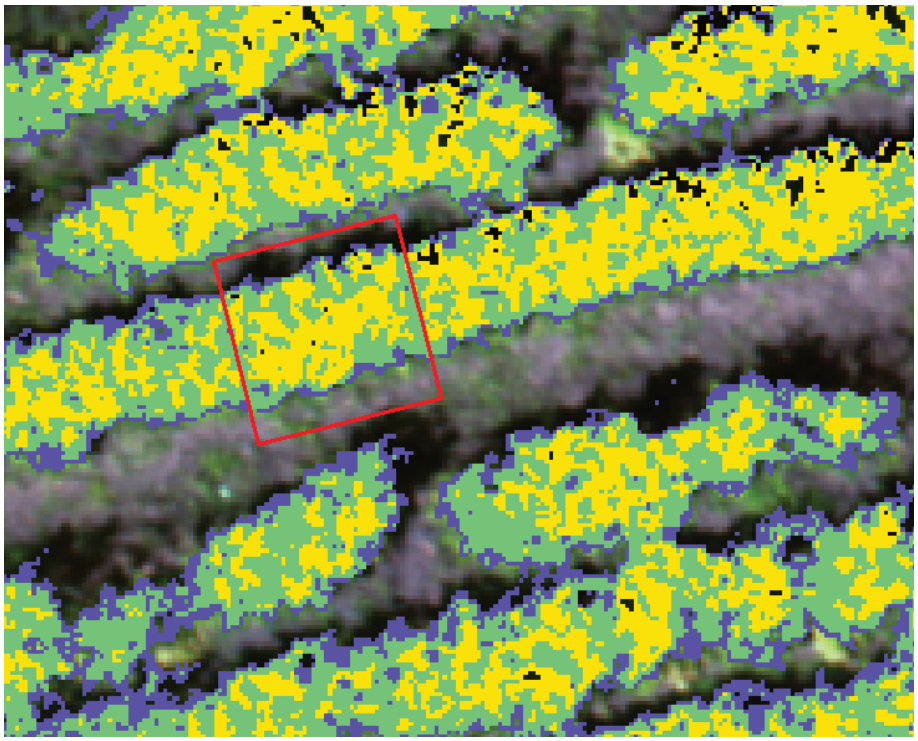


Figura 1. Extracción de los valores digitales de NDRE por subparcela, EEAFBM, La Garita, Costa Rica.

La discriminación de estas zonas de vigor se realizó mediante el índice de Moran, el cual permitió evaluar la autocorrelación espacial e identificar la existencia de patrones de agrupamiento (*clustering*) o dispersión entre las categorías de vigor. Para ello, se siguió una metodología similar a la propuesta por Posite et al [20].

Con base en esta variabilidad, se establecieron parcelas de muestreo georreferenciadas distribuidas de acuerdo con las diferentes condiciones de vigor presentes en cada lote (Figura 2), de manera que la información obtenida fuera representativa del comportamiento agronómico del cultivo.

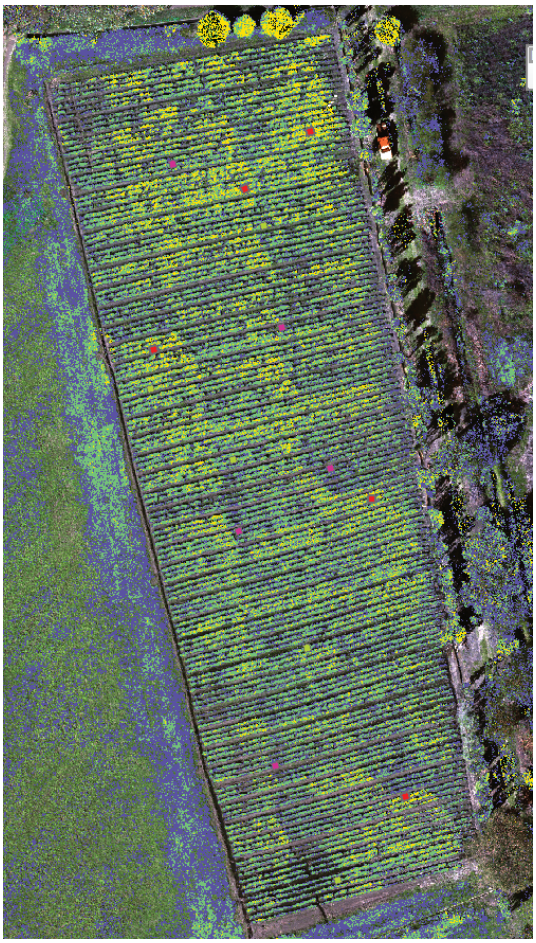


Figura 2. Distribución de parcelas evaluadas según diferentes niveles de vigor estimados con el índice de vegetación NDRE.

Posteriormente, se delimitaron parcelas digitales de un metro lineal dentro de cada ortomosaico, en las cuales se definieron las áreas de interés para la extracción de datos multiespectrales, que incluyeron valores de reflectancia en las distintas bandas y los índices de vegetación previamente descritos.

Las subparcelas se representaron vectorialmente mediante polígonos creados con QGIS (QGIS Development Team, 2023), versión 3.32.0. Se generaron polígonos virtuales por vuelo, los cuales se almacenaron en formato ESRI Shapefile.

Finalmente, se extrajeron los valores de píxeles de los rásteres delimitados geográficamente por las capas vectoriales utilizando Python versión 3.11.5 y las librerías GDAL/OGR (GDAL/OGR contributors, 2022) para la manipulación de datos geoespaciales. Así, se obtuvieron los valores de reflectancia de interés, los cuales se almacenaron en formato CSV.

Datos de rendimiento

Durante la etapa fenológica R9 (Cosecha) se recolectaron las vainas de cada una de las parcelas definidas como puntos de muestreo, y se determinaron los componentes de rendimiento por cada metro lineal de cultivo, tales como: peso de 100 granos (100PG, g/m), número de vainas por metro (NV, vainas/m), número de plantas (NP, plantas/m), número de granos (NG, granos/m) y peso total de granos (PTG, g/m).

En total, se muestrearon 141 subparcelas, obteniéndose 141 observaciones para cada uno de los componentes del rendimiento. La distribución de las muestras fue la siguiente: 42 muestras de la variedad Cabécar en Caño Negro; 42 muestras de la variedad Matambú en Pavón de Los Chiles; 42 muestras de las variedades Diquís y Nambí en el lote 32 de la EEAFBM; y 15 muestras de las variedades Cabécar y Nambí en el lote 15 de la EEAFBM.

Correlación de Pearson y ajuste de los modelos lineales

La información del rendimiento por parcela y los promedios de reflectancias, e índices, se analizaron por medio del método de correlación de Pearson para determinar la relación lineal entre estas variables. Esto se realizó con el paquete estadístico JMP Pro15.

Mediante el mismo software se verificó el cumplimiento de los supuestos de normalidad y homocedasticidad de los datos. Posteriormente, se ajustaron modelos de regresión lineal por mínimos cuadrados ordinarios para estimar el componente de rendimiento que presentó la mayor correlación con los índices de vegetación. En dichos modelos, los índices de vegetación se emplearon como variables predictoras y el componente de rendimiento como variable respuesta, obteniéndose la ecuación de regresión correspondiente. La bondad de ajuste de cada modelo se evaluó mediante el coeficiente de determinación (R^2) (Ec. 1):

$$R^2 = 1 - \left(\frac{SC_residuos}{SC_total}\right) \quad (1)$$

El *SC_residuos* es la suma de los cuadrados del error residual de las predicciones, y *SC_total* es la suma total de cuadrados de los datos u observaciones.

Resultados y Discusión

Análisis de correlación independiente, según ubicación y variedad de frijol.

Se realizaron análisis de correlación de Pearson entre los valores de los componentes de rendimiento y la reflectancia de las bandas analizadas e índices de vegetación. Inicialmente, estas correlaciones se realizaron para cada uno de los diferentes sitios (Caño Negro, El Pavón y EEAFBM) y materiales genéticos de frijol con los que se trabajó (Matambú, Cabécar, Nambí y Diquís). Estos valores se presentaron en las figuras 3 y 4.

En las matrices de correlación presentadas, los valores superiores a 0,75 hasta cercanos a 1 se observan en color azul. Mientras que los valores menores a -0,75 se presentan en rojo oscuro. En ambos casos, estos valores indicaron una relación lineal fuerte entre las variables analizadas. Las cuadrículas de color blanco y colores claros correspondieron a una baja correlación entre los datos.

Pavón

Variables	Número de plantas	Número de vainas	Peso de granos (g)	Peso de 100 granos (g)	Número de granos	Borde rojo	NIR	Rojo	Verde	NDVI	NGDRI	SR	NDRE	Cl Red-Edge	GCI
Número de plantas	1,00														
Número de vainas	0,39	1,00													
Peso de granos (g)	0,41	0,96	1,00												
Peso de 100 granos (g)	-0,24	-0,29	-0,19	1,00											
Número de granos	0,41	0,95	0,95	-0,37	1,00										
Borde rojo	0,48	0,61	0,70	-0,19	0,65	1,00									
NIR	0,43	0,89	0,89	-0,22	0,86	0,84	1,00								
Rojo	-0,38	-0,82	-0,84	0,24	-0,80	-0,83	-0,96	1,00							
Verde	0,13	-0,10	0,02	-0,06	-0,04	0,43	0,04	-0,04	1,00						
NDVI	0,42	0,82	0,84	-0,22	0,80	0,89	0,97	-0,98	0,12	1,00					
NGDRI	0,45	0,77	0,81	-0,25	0,77	0,91	0,95	-0,96	0,22	0,98	1,00				
SR	0,42	0,89	0,88	-0,24	0,85	0,78	0,99	-0,95	-0,04	0,95	0,93	1,00			
NDRE	0,39	0,90	0,89	-0,22	0,86	0,77	0,99	-0,97	-0,05	0,96	0,93	0,99	1,00		
Cl Red-Edge	0,38	0,91	0,88	-0,20	0,85	0,72	0,98	-0,94	-0,10	0,93	0,90	0,99	0,99	1,00	
GCI	0,38	0,91	0,88	-0,21	0,85	0,71	0,98	-0,94	-0,12	0,93	0,90	0,99	0,99	1,00	1,00

Caño Negro

Variables	Número de plantas	Número de vainas	Peso de granos (g)	Peso de 100 granos (g)	Número de granos	Borde rojo	NIR	Rojo	Verde	NDVI	NGDRI	SR	NDRE	Cl Red-Edge	GCI
Número de plantas	1.00														
Número de vainas	0.27	1.00													
Peso de granos (g)	0.35	0.83	1.00												
Peso de 100 granos (g)	0.07	0.03	0.29	1.00											
Número de granos	0.38	0.85	0.98	0.12	1.00										
Borde rojo	0.18	0.52	0.59	0.00	0.59	1.00									
NIR	0.21	0.68	0.72	0.12	0.70	0.89	1.00								
Rojo	-0.29	-0.67	-0.64	-0.18	-0.65	-0.68	-0.75	1.00							
Verde	0.18	0.40	0.49	-0.06	0.50	0.97	0.80	-0.54	1.00						
NDVI	0.28	0.69	0.70	0.16	0.70	0.85	0.89	-0.95	0.73	1.00					
NGDRI	0.27	0.65	0.66	0.08	0.67	0.90	0.88	-0.93	0.80	0.99	1.00				
SR	0.23	0.73	0.70	0.12	0.70	0.82	0.96	-0.85	0.69	0.93	0.92	1.00			
NDRE	0.26	0.74	0.72	0.15	0.71	0.66	0.91	-0.78	0.53	0.85	0.79	0.94	1.00		
Cl Red-Edge	0.22	0.73	0.71	0.18	0.70	0.66	0.93	-0.74	0.52	0.82	0.76	0.95	0.98	1.00	
GCI	0.20	0.73	0.71	0.19	0.69	0.67	0.92	-0.77	0.51	0.84	0.79	0.96	0.97	0.99	1.00

Figura 3. Correlaciones entre los componentes de rendimiento y los datos multiespectrales. Las matrices de correlación se construyeron a partir de los datos recolectados en diferentes ubicaciones (El Pavón y Caño Negro) y de distintos materiales genéticos de frijol.

EEAFBM 15

Variables	Número de plantas	Número de vainas	Peso de granos (g)	Peso de 100 granos (g)	Número de granos	Borde rojo	NIR	Rojo	Verde	NDVI	NGDRI	SR	NDRE	CI Red-Edge	GCI
Número de plantas	1,00														
Número de vainas	0,85	1,00													
Peso de granos (g)	0,88	0,80	1,00												
Peso de 100 granos (g)	0,10	0,21	-0,02	1,00											
Número de granos	0,83	0,80	0,99	-0,02	1,00										
Borde rojo	0,20	0,10	0,18	-0,30	0,10	1,00									
NIR	0,50	0,47	0,50	-0,04	0,41	0,83	1,00								
Rojo	-0,44	-0,48	-0,42	-0,43	-0,38	0,07	-0,44	1,00							
Verde	-0,04	-0,18	-0,08	-0,43	-0,13	0,89	0,49	0,49	1,00						
NDVI	0,51	0,51	0,50	0,25	0,42	0,39	0,81	-0,87	-0,05	1,00					
NGDRI	0,44	0,42	0,42	0,15	0,32	0,62	0,90	-0,73	0,22	0,94	1,00				
SR	0,52	0,55	0,53	0,32	0,45	0,38	0,80	-0,84	-0,07	0,95	0,94	1,00			
NDRE	0,59	0,67	0,60	0,33	0,55	0,09	0,63	-0,88	-0,35	0,90	0,74	0,88	1,00		
CI Red-Edge	0,76	0,81	0,68	0,26	0,65	0,00	0,46	-0,67	-0,35	0,65	0,53	0,70	0,80	1,00	
GCI	0,74	0,78	0,68	0,28	0,64	0,01	0,47	-0,70	-0,34	0,67	0,56	0,73	0,80	1,00	1,00

EEAFBM 32

Variables	Número de plantas	Número de vainas	Peso de granos (g)	Peso de 100 granos (g)	Número de granos	Borde rojo	NIR	Rojo	Verde	NDVI	NGDRI	SR	NDRE	CI Red-Edge	GCI
Número de plantas	1,00														
Número de vainas	0,55	1,00													
Peso de granos (g)	0,46	0,95	1,00												
Peso de 100 granos (g)	-0,09	-0,18	0,04	1,00											
Número de granos	0,47	0,98	0,97	-0,18	1,00										
Borde rojo	0,58	0,84	0,78	-0,19	0,81	1,00									
NIR	0,11	0,72	0,73	-0,19	0,76	0,61	1,00								
Rojo	-0,69	-0,77	-0,68	0,25	-0,73	-0,88	-0,38	1,00							
Verde	-0,54	-0,11	-0,01	0,07	-0,02	-0,36	0,49	0,54	1,00						
NDVI	0,56	0,85	0,80	-0,25	0,84	0,92	0,68	-0,92	-0,20	1,00					
NGDRI	0,55	0,88	0,82	-0,25	0,87	0,90	0,69	-0,91	-0,17	0,99	1,00				
SR	0,60	0,91	0,84	-0,24	0,88	0,96	0,64	-0,89	-0,31	0,92	0,93	1,00			
NDRE	0,57	0,85	0,79	-0,21	0,83	0,99	0,63	-0,90	-0,33	0,95	0,92	0,96	1,00		
CI Red-Edge	0,58	0,84	0,78	-0,19	0,81	1,00	0,61	-0,89	-0,37	0,92	0,90	0,96	0,99	1,00	
GCI	0,61	0,85	0,77	-0,22	0,81	0,99	0,60	-0,87	-0,38	0,90	0,88	0,97	0,98	0,99	1,00

Figura 4. Correlaciones entre los componentes de rendimiento y los datos multiespectrales. Las matrices de correlación se construyeron a partir de los datos recolectados en diferentes ubicaciones (EEAFBM 15 y EEAFBM 32) y de distintos materiales genéticos de frijol.

Correlación entre componentes de rendimiento del cultivo de frijol.

Al calcular los coeficientes de correlación entre las variables asociadas a los componentes de rendimiento en los cuatro escenarios analizados, se observó que la variable de respuesta NV presentó las correlaciones más fuertes en todos los sitios evaluados, por lo que fue el componente de rendimiento con la mayor relación lineal con la reflectancia y los índices de vegetación analizados.

Otras variables respuesta, como NG y PTG, también mostraron altos valores de correlación, lo que indicó una relación lineal respecto a los datos multiespectrales. Sin embargo, estas correlaciones fueron inferiores a las obtenidas por NV (ver Figura 3 y 4). El número de plantas, así como el peso de 100 granos, no presentaron correlaciones significativas.

Debido a que la variable respuesta NV presentó de forma consistente las correlaciones más altas en los cuatro escenarios evaluados, el análisis posterior se realizó utilizando este componente de rendimiento.

Correlación de NV con los valores de reflectancia de las bandas e índices de vegetación.

Dado que el componente NV mostró la relación lineal más fuerte con las bandas de reflectancia y los índices de vegetación evaluados, fue seleccionado como la variable con mayor capacidad de asociación con la información multiespectral. Esta selección permitió enfocar el análisis en la variable con mayor relevancia espectral, evitando incluir componentes de rendimiento con menor relación con las variables derivadas de sensores multiespectrales. De esta manera, se optimizó el uso de los datos disponibles hacia una variable con mayor potencial de aplicación práctica bajo condiciones de campo.

Los valores de correlación para el lote 15 de la EEAFBM, en el cual se utilizó la variedad Diquís y Nambí, presentó una fuerte correlación de 0,81 entre NV y el índice CI Red-Edge (Figura 4). Otro índice con el que se obtuvo una alta correlación (r = 0,78) fue el GCI. El NDRE mostró valores de correlación de 0,67 con NV. Adicionalmente, los resultados mostraron que tanto el índice SR como el NDVI presentaron correlaciones moderadas con NV, con un valor de r = 0,5

En el lote 32 de la EEAFBM, se utilizaron las variedades Cabécar y Nambí. Los índices que mejor correlacionaron con NV fueron SR con un valor de 0,91, NGRDI con 0,88; NDVI, GCI y NDRE, con valores de 0,85. El índice CI Red-Edge y la banda borde rojo alcanzaron valores de 0,84. Además, la banda Roja y NIR presentaron valores de correlación de 0,77 y 0,72 respectivamente, lo cual indicó que la mayoría de las bandas y los índices evaluados obtuvieron una buena correlación con NV, indistintamente del sitio y de la línea de frijol utilizada.

En Caño Negro se evaluó un lote de producción de frijol Cabécar. Los valores de correlación de las bandas e índices de vegetación fueron menores a los obtenidos en los dos escenarios anteriores.

El índice NDRE mostró una correlación de 0,74 con NV, los índices SR, GCI y CI Red-Edge, exhibieron valores de 0,73. Mientras que los índices NDVI, NGRDI, y las bandas NIR y roja, presentaron valores entre 0,65 y 0,69.

En la zona de Pavón, la variedad de frijol que se analizó fue Matambú. La correlación de los índices de vegetación y los valores de reflectancia de las bandas evaluadas con respecto a NV fue mayor que la observada en Caño Negro. En esta zona la correlación con los índices GCI y CI Red-Edge fue de 0,91. Así mismo, para NDRE, SR y la banda NIR, fue de 0,89.

Los índices NDVI y NGRDI y las bandas NIR y Rojo obtuvieron una correlación con NV de 0,82, 0,77, 0,89 y -0,82 respectivamente. Independientemente del sitio, la banda verde tuvo una baja correlación con los componentes de rendimiento.

Correlación del número de vainas con variables espectrales mediante la integración de localidades y variedades evaluadas

La evaluación conjunta de los diferentes escenarios (sitios y variedades) permitió evaluar el efecto de la variabilidad sobre los valores de correlación de las variables de respuesta ligadas a componentes de rendimiento y las bandas e índices de vegetación.

Si bien en todos los casos se observaron índices y bandas con correlaciones superiores a 0,6 con variables como NV (Figura 5), la ubicación y la variedad de frijol en conjunto podría tener un efecto sobre las relaciones lineales (Figura 3 y 4).

Variables	Número de plantas	Número de vainas	Peso de granos (g)	Peso de 100 granos (g)	Número de granos	Borde rojo	NIR	Rojo	Verde	NDVI	NGDRI	SR	NDRE	CI Red-Edge	GCI
Número de plantas	1.00														
Número de vainas	0.44	1.00													
Peso de granos (g)	0.48	0.75	1.00												
Peso de 100 granos (g)	0.06	-0.05	0.37	1.00											
Número de granos	0.46	0.85	0.93	0.06	1.00										
Borde rojo	0.20	-0.03	0.25	0.41	0.14	1.00									
NIR	0.14	0.62	0.28	-0.15	0.39	-0.02	1.00								
Rojo	-0.42	-0.71	-0.58	-0.17	-0.59	0.04	-0.57	1.00							
Verde	-0.20	-0.12	-0.15	-0.16	-0.10	0.38	0.39	0.34	1.00						
NDVI	0.32	0.68	0.54	0.18	0.56	0.11	0.78	-0.91	0.01	1.00					
NGDRI	0.37	0.69	0.59	0.18	0.60	0.20	0.77	-0.86	0.15	0.95	1.00				
SR	0.36	0.77	0.56	0.08	0.59	-0.05	0.82	-0.87	-0.08	0.88	0.89	1.00			
NDRE	0.28	0.69	0.46	0.17	0.48	-0.01	0.80	-0.86	-0.12	0.92	0.82	0.91	1.00		
CI Red-Edge	0.29	0.67	0.36	0.06	0.40	-0.05	0.85	-0.74	-0.03	0.82	0.75	0.90	0.94	1.00	
GCI	0.32	0.73	0.41	-0.04	0.48	-0.16	0.83	-0.77	-0.11	0.81	0.74	0.92	0.92	0.98	1.00

Figura 5. Correlaciones de componentes de rendimiento con todos los materiales de frijol en distintas ubicaciones.

Al combinar los datos procedentes de todas las localidades y materiales, se observó (Figura 5) que NV fue la variable respuesta que presentó los mayores valores de correlación con respecto a las bandas e índices de vegetación, similar a lo reportado en estudios con soja, donde el NDVI y otros índices multiespectrales mostraron fuertes relaciones con el número de vainas y el rendimiento de grano [21].

Además, las variables respuesta NG y PTG presentaron correlaciones de 0,85 y 0,75 con respecto a NV, respectivamente, lo cual evidenció la relación existente entre los componentes de rendimiento del cultivo. Estos resultados respaldaron la selección de NV como la variable con mayor potencial para su estimación mediante información multiespectral, debido a su mayor asociación con las bandas e índices evaluados.

Los índices de vegetación SR y GCI fueron los que presentaron las mayores correlaciones en comparación a otros índices de vegetación y bandas, con un valor de 0,77 respecto a NV. La banda roja presentó un valor de -0,71, lo cual indicó una alta correlación negativa con NV.

Además, otros índices de vegetación como NDRE, NGRDI y NDVI presentaron correlaciones entre 0,68 y 0,69 con esta variable. Por su parte, la banda NIR alcanzó una correlación de 0,62 con esta variable.

Ecuaciones de predicción de número de vainas con los valores de índices de vegetación.

Como consecuencia de las relaciones encontradas entre NV y los índices SR y GCI, se ajustaron modelos lineales simples, para obtener una ecuación donde se relacione el NV con el índice SR y GCI como predictor.

Cuando se utilizó el índice SR, el modelo fue significativo ($p < 0,05$) y es expresado por la ecuación 2:

$$Número\ de\ vainas = 6,28 \times SR + 16,89 \quad (2)$$

La relación lineal entre el índice SR y el número de vainas se presenta en la Figura 6. El modelo obtuvo un coeficiente de determinación (R^2) de 0,59, indicando que el índice SR explicó el 59 % de la variabilidad observada en el número de vainas.

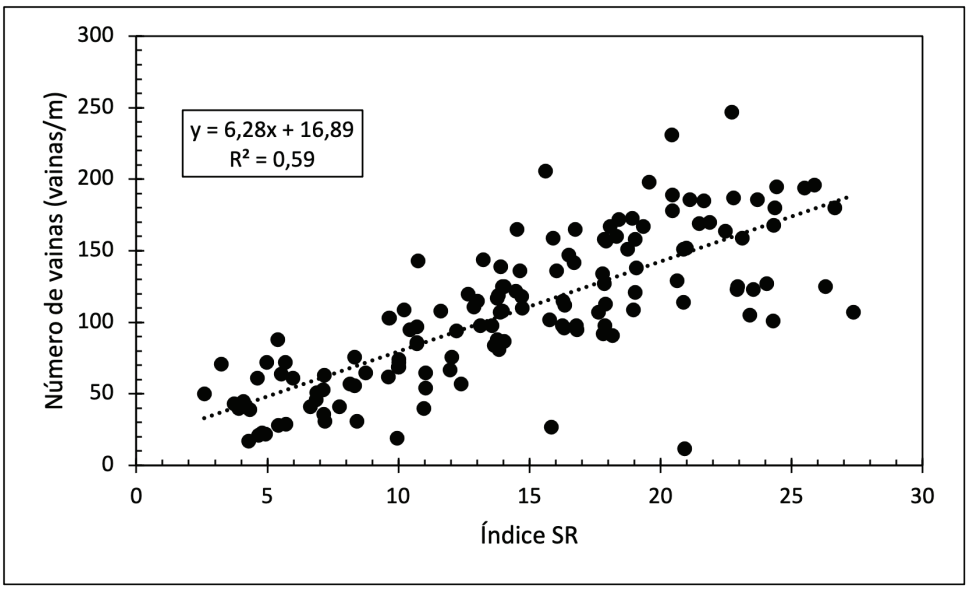


Figura 6. Gráfico de dispersión entre el índice SR y el número de vainas (n = 141) con línea de tendencia de predicción del modelo lineal simple.

Al utilizar el Índice de Clorofila Verde (GCI) como predictor, y ajustar el modelo lineal simple este también resultó estadísticamente significativo (F, $p < 0,05$) y se puede expresar por la ecuación 3:

$$Número\ de\ vainas = 23,13 \times GCI + 3,93 \quad (3)$$

La relación entre el índice GCI y NV presentó un R^2 de 0,54 (Figura 7).

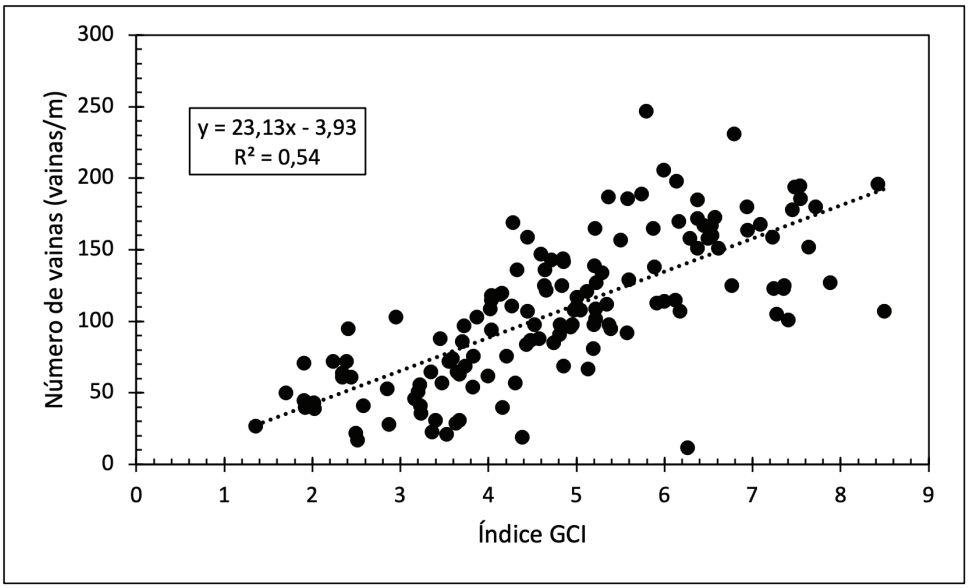


Figura 7. Gráfico de dispersión entre el índice GCI y el número de vainas (n=141) con línea de tendencia de predicción del modelo lineal simple.

Existen diversas publicaciones que han evaluado el uso de sensores remotos e índices de vegetación para analizar su relación con los componentes de rendimiento en el cultivo frijol; sin embargo, estos estudios se han desarrollado principalmente bajo condiciones uniformes o controladas, generalmente en una misma zona experimental, sin considerar el efecto que puede generar una mayor variabilidad ambiental y genética sobre los resultados [5], [22], limitando la extrapolación de sus conclusiones a contextos más generales y menos controlados como lo son los campos de producción en Costa Rica.

Adicionalmente, en investigaciones similares no han reportado correlaciones entre variables espectrales y componentes de rendimiento superiores a 0,50 durante la etapa fenológica R5 [5], [23].

En contraste, el presente estudio identificó asociaciones más fuertes entre los índices de vegetación y el número de vainas (NV) en la etapa R5, alcanzando coeficientes de correlación de Pearson de hasta 0,77.

La implementación de modelos lineales permitió identificar los índices de vegetación SR y GCI como las variables espectrales con mayor capacidad para explicar la variabilidad observada en el número de vainas (NV), con un coeficiente de determinación superior al 50 %.

Estos resultados respaldan el uso de ambos índices como herramientas para el monitoreo del cultivo y constituyen una base para futuras aplicaciones orientadas a la estimación temprana del potencial productivo del cultivo de frijol.

Los métodos tradicionales de estimación de producción son lentos, subjetivos y de alto costo, además de estar limitados a áreas puntuales [24]. En contraste, los enfoques basados en sensores remotos y modelado predictivo permitirían realizar estimaciones del número de vainas con 40-52 días de anticipación a la cosecha, periodo correspondiente a la fase R5 del cultivo [18]. La implementación de esta tecnología podría facilitar que los productores anticipen escenarios productivos y con esto mejorar la toma de decisiones comerciales y agronómicas mediante información espacialmente explícita y oportuna.

Conclusiones

Los resultados demostraron que la teledetección mediante sensores multiespectrales y el cálculo de índices de vegetación, como el cociente simple (SR) y el índice de clorofila verde (GCI), presentaron correlaciones superiores a 0,77 con el número de vainas (NV) en frijol común durante la etapa fenológica R5, lo que permitió identificarlos como variables predictoras de este componente de rendimiento.

Los modelos lineales desarrollados a partir de los índices SR y GCI alcanzaron valores de R^2 de hasta 0,59 para la predicción del número de vainas, lo que respalda su utilidad como variables espectrales para la estimación de este componente de rendimiento, aun bajo la variabilidad asociada a las diferentes zonas de producción y materiales genéticos evaluados.

El análisis espectral evidenció que la banda roja presentó una relación inversa con el número de vainas (r = -0,71), por lo que se identificó como una variable espectral de interés para evaluaciones preliminares del desarrollo del cultivo. Este resultado sugiere que, para aplicaciones de monitoreo, podrían evaluarse plataformas de adquisición de imágenes de menor costo, como drones comerciales equipados con sensores RGB, siempre que los productos derivados sean previamente calibrados y validados bajo las condiciones específicas del cultivo.

Agradecimientos

Esta investigación se ejecutó gracias al apoyo del Instituto Nacional de Innovación y Transferencia de Tecnología Agropecuaria (INTA), de la Vicerrectoría de Investigación y de la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno de la Universidad de Costa Rica. Al proyecto KoLFACI (Iniciativa de Cooperación para la Alimentación y la Agricultura entre Corea y Latinoamérica) y la Alianza Bioversity – CIAT.

Referencias

[1] I. Hayat, A. Ahmad, T. Masud, A. Ahmed, and S. Bashir, “Nutritional and Health Perspectives of Beans (*Phaseolus vulgaris* L.): An Overview,” *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, vol. 54, no. 5, pp. 580–592, Jan. 2014, doi: 10.1080/10408398.2011.596639.

[2] K. O’Neal, “Semilla UCR: Así contribuimos para que los frijoles lleguen a su mesa,” Universidad de Costa Rica, Aug. 13, 2020. Accessed: Oct. 23, 2025. [Online]. Available: https://www.ucr.ac.cr/noticias/2020/08/13/semilla-ucr-asi-contribuimos-para-que-los-frijoles-lleguen-a-su-mesa.html

[3] D. Brown *et al.*, “Rank-based data synthesis of common bean on-farm trials across four Central American countries,” *Crop Science*, vol. 62, no. 6, pp. 2246–2266, Nov. 2022, doi: 10.1002/csc2.20817.

[4] D. Gomez *et al.*, “Advancing common bean (Phaseolus vulgaris L.) disease detection with YOLO driven deep learning to enhance agricultural AI,” *Sci Rep*, vol. 14, no. 1, p. 15596, Jul. 2024, doi: 10.1038/s41598-024-66281-w.

[5] D. Saravia *et al.*, “Yield Prediction of Four Bean (Phaseolus vulgaris) Cultivars Using Vegetation Indices Based on Multispectral Images from UAV in an Arid Zone of Peru,” *Drones*, vol. 7, no. 5, p. 325, May 2023, doi: 10.3390/drones7050325.

[6] S. B. Dhal and D. Kar, “Transforming Agricultural Productivity with AI-Driven Forecasting: Innovations in Food Security and Supply Chain Optimization,” *Forecasting*, vol. 6, no. 4, pp. 925–951, Oct. 2024, doi: 10.3390/forecast6040046.

[7] F. Farrokhi and H. S. Pellegrina, “Trade, Technology, and Agricultural Productivity,” *Journal of Political Economy*, vol. 131, no. 9, pp. 2509–2555, Sep. 2023, doi: 10.1086/724319.

[8] OECD, *Fostering Productivity and Competitiveness in Agriculture*. OECD, 2011. doi: 10.1787/9789264166820-en.

[9] G. Singhal, B. Bansod, L. Mathew, J. Goswami, B. U. Choudhury, and P. L. N. Raju, "Chlorophyll estimation using multi-spectral unmanned aerial system based on machine learning techniques," *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, vol. 15, p. 100235, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.rsase.2019.100235.

[10] E. E. Da Silva, F. H. Rojo Baio, L. P. Ribeiro Teodoro, C. A. Da Silva Junior, R. S. Borges, and P. E. Teodoro, "UAV-multispectral and vegetation indices in soybean grain yield prediction based on in situ observation," *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, vol. 18, p. 100318, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.rsase.2020.100318.

[11] T. S. T. Tanaka *et al.*, "Review of Crop Phenotyping in Field Plot Experiments Using UAV-Mounted Sensors and Algorithms," *Drones*, vol. 8, no. 6, p. 212, May 2024, doi: 10.3390/drones8060212.

[12] D. Li, C. Li, Y. Yao, M. Li, and L. Liu, "Modern imaging techniques in plant nutrition analysis: A review," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 174, p. 105459, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.compag.2020.105459.

[13] T. Javornik, K. Carović-Stanko, J. Gunjača, M. Vidak, and B. Lazarević, "Monitoring Drought Stress in Common Bean Using Chlorophyll Fluorescence and Multispectral Imaging," *Plants*, vol. 12, no. 6, p. 1386, Mar. 2023, doi: 10.3390/plants12061386.

[14] L. T. Boechat, F. D. A. D. C. Pinto, T. J. D. Paula Júnior, D. M. Queiroz, and H. Teixeira, "Detecção do mofo-branco no feijoeiro, utilizando características espectrais," *Rev. Ceres*, vol. 61, no. 6, pp. 907–915, Dec. 2014, doi: 10.1590/0034-737X201461060004.

[15] G. Girón and A. Pagani, "Evaluación del índice de vegetación diferencial normalizado para delinear zonas de manejo de nitrógeno para el cultivo de maíz," *INTA*, vol. Memoria Técnica 2017-2018, 2018.

[16] S. Sankaran, J. Zhou, L. R. Khot, J. J. Trapp, E. Mndolwa, and P. N. Miklas, "High-throughput field phenotyping in dry bean using small unmanned aerial vehicle based multispectral imagery," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 151, pp. 84–92, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.compag.2018.05.034.

[17] R. Ranjan *et al.*, "Irrigated pinto bean crop stress and yield assessment using ground based low altitude remote sensing technology," *Information Processing in Agriculture*, vol. 6, no. 4, pp. 502–514, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.inpa.2019.01.005.

[18] J. A. Clavijo Michelangeli, M. Bhakta, S. A. Gezan, K. J. Boote, and C. E. Vallejos, "From flower to seed: identifying phenological markers and reliable growth functions to model reproductive development in the common bean (*P haseolus vulgaris L .*)," *Plant Cell & Environment*, vol. 36, no. 11, pp. 2046–2058, Nov. 2013, doi: 10.1111/pce.12114.

[19] A. Vera-Esmeraldas, S. Pizarro-Oteíza, M. Labbé, F. Rojo, and F. Salazar, "UAV-Based Spectral and Thermal Indices in Precision Viticulture: A Review of NDVI, NDRE, SAVI, GNDVI, and CWSI," *Agronomy*, vol. 15, no. 11, p. 2569, Nov. 2025, doi: 10.3390/agronomy15112569.

[20] V. R. Posite *et al.*, "Decoding Vegetation Dynamics in High-Altitude Tropical Ecosystems: A Spatio-Temporal Assessment Using Multi-Index and Biophysical Remote Sensing Products (2002–2024)," *Earth Syst Environ*, Aug. 2025, doi: 10.1007/s41748-025-00750-8.

[21] M. Nolasco, G. Ovando, S. Sayago, I. Magario, and M. Bocco, "Estimating soybean yield using time series of anomalies in vegetation indices from MODIS," *International Journal of Remote Sensing*, vol. 42, no. 2, pp. 405–421, Jan. 2021, doi: 10.1080/01431161.2020.1809736.

[22] V. A. Filla, A. P. Coelho, J. V. T. Bettiol, F. T. Leal, L. B. Lemos, and D. L. Rosalen, "Model performance in estimating the yield of common bean cultivars," *RCA*, vol. 54, no. 1, 2023, doi: 10.5935/1806-6690.20230002.

[23] H. F. E. De Oliveira *et al.*, "Geotechnologies in Biophysical Analysis through the Applicability of the UAV and Sentinel-2A/MSI in Irrigated Area of Common Beans: Accuracy and Spatial Dynamics," *Remote Sensing*, vol. 16, no. 7, p. 1254, Apr. 2024, doi: 10.3390/rs16071254.

[24] A. M. Ali *et al.*, "Crop Yield Prediction Using Multi Sensors Remote Sensing (Review Article)," *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, vol. 25, no. 3, pp. 711–716, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.ejrs.2022.04.006.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores aquí firmantes declaramos que no se utilizó ninguna herramienta de IA para la conceptualización, traducción o redacción de este artículo.

Análisis y mitigación de la exposición electromagnética en cruces de infraestructura vial y líneas de transmisión de alta tensión: estudio aplicado de seguridad operacional

Analysis and Mitigation of Electromagnetic Exposure in Road Infrastructure Crossings with High-Voltage Transmission Lines: An Applied Study on Operational Safety

Juan David Losada-Losada[1], Darwin Fabio Marín-Yepez[2]

Fecha de recepción: 11 de diciembre, 2025
Fecha de aprobación: 6 d abril, 2026

Losada-Losada, J.D; Marín-Yepez, D.F. Análisis y mitigación de la exposición electromagnética en cruces de infraestructura vial y líneas de transmisión de alta tensión: estudio aplicado de seguridad operacional. *Tecnología en Marcha*. Vol. 39 Nº 4. Octubre-Diciembre, 2026. Pág. 20-31.

https://doi.org/10.18845/tm.v39i4.8385

1 Universidad de Manizales.Colombia.
jdlosadal@unal.edu.co
https://orcid.org/0000-0001-9935-9977
2 Universidad de Manizales. Colombia.
dmariny@unal.edu.co
https://orcid.org/0000-0002-2709-361X

Palabras clave

Campos electromagnéticos; líneas de transmisión de alta tensión; seguridad eléctrica; evaluación de exposición electromagnética; mitigación de riesgo.

Resumen

Este estudio tuvo como propósito evaluar los campos eléctricos y magnéticos generados por una línea de transmisión de 500 kV sobre un puente peatonal, verificar su cumplimiento normativo y proponer medidas de mitigación. Para ello, se emplearon las formulaciones de coeficientes de potencial de Maxwell para el cálculo del campo eléctrico y la ley de Biot–Savart para la estimación del campo magnético. El análisis consideró un haz de cuatro subconductores por fase, corrientes de 2000 A y 4083 A, así como la presencia de fenómenos de microdescargas. Los resultados indican que el campo eléctrico máximo fue de 3,12 kV/m y el campo magnético máximo alcanzó 42,24 µT, valores que se mantienen por debajo de los límites establecidos por el RETIE y la ICNIRP. Las microdescargas, aunque perceptibles, no representan un riesgo para la salud. La proximidad entre la infraestructura vial y las líneas de transmisión hace necesario implementar acciones que reduzcan la percepción de riesgo y garanticen condiciones adecuadas de seguridad conforme a la normativa internacional. En este contexto, la coexistencia del puente y la línea de transmisión es viable siempre que se apliquen medidas de mitigación como la equipotencialización, la puesta a tierra, el aislamiento de pasamanos y el control operativo.

Keywords

Electromagnetic fields; high-voltage transmission lines; electrical safety; electromagnetic exposure assessment; risk mitigation.

Abstract

This study aimed to evaluate the electric and magnetic fields generated by a 500 kV transmission line over a pedestrian bridge, assess compliance with applicable standards, and propose mitigation measures. The analysis employed Maxwell's potential-coefficient formulations for the electric field and the Biot–Savart law for the magnetic field. A bundle of four subconductors per phase, operating currents of 2000 A and 4083 A, and the occurrence of microdischarge phenomena were considered. The maximum electric field reached 3.12 kV/m, while the maximum magnetic field was 42.24 µT, both remaining below the limits established by RETIE and ICNIRP. Although microdischarges may be perceptible, they do not pose a health risk. The close proximity between roadway infrastructure and high-voltage transmission lines underscores the need for actions that reduce perceived risk and ensure adequate safety in accordance with international regulations. Under appropriate mitigation measures—such as equipotential bonding, grounding, handrail insulation, and operational control—the coexistence of the pedestrian bridge and the transmission line is considered technically feasible.

Introducción

La coexistencia de infraestructura vial y sistemas de transmisión eléctrica de extra alta tensión (EHV) plantea desafíos significativos en términos de seguridad vial, continuidad urbana y exposición a campos electromagnéticos (CEM) de frecuencia industrial (50/60 Hz). Estas interacciones requieren evaluaciones técnicas rigurosas para garantizar el cumplimiento

normativo y la aceptación social, dado que los campos eléctricos y magnéticos generados por las líneas de transmisión influyen tanto en la percepción del riesgo como en la seguridad de los usuarios [1]–[5].

La radiación electromagnética se clasifica en ionizante y no ionizante, siendo esta última la asociada a los sistemas eléctricos de potencia. A diferencia de la ionizante, que puede producir daños biológicos al inducir ionización, la radiación no ionizante carece de energía suficiente para alterar la estructura atómica de los materiales, aunque su exposición prolongada genera inquietud social y científica [6],[7].

Diversos estudios han analizado la exposición de poblaciones cercanas a líneas de transmisión, evaluando no solo el impacto en la salud humana, sino también en fauna y flora [8]-[12]. En particular, Ahmadi et al. [13] señalan que, si bien los riesgos para residentes alejados son mínimos, la permanencia prolongada bajo la línea sí constituye un factor crítico. Asimismo, se ha identificado que la altura del conductor es determinante en la mitigación del campo eléctrico a nivel del suelo [14].

Otros trabajos han abordado el riesgo desde la perspectiva de la infraestructura eléctrica. Rezaian [15] propone medidas para reducir riesgos en zonas residenciales próximas a líneas de alta tensión, mientras que Hu et al. [16] analizan la confiabilidad del sistema considerando condiciones climáticas extremas y el factor humano.

En este contexto, el proyecto Autopista Conexión Pacífico Tres, enmarcado en el Plan Nacional de Desarrollo (PND) 2010–2014, introdujo una reconfiguración vial que conectó los municipios de La Felisa y La Manuela (Caldas, Colombia), específicamente en el sector K14+070. Esta intervención fragmentó la conectividad urbana, generando dos márgenes sin un cruce peatonal seguro y exponiendo a la comunidad a flujos vehiculares de alta velocidad. Para restituir la movilidad peatonal y garantizar la seguridad, se proyectó un puente peatonal cuya ubicación coincidió con la franja de servidumbre de una línea de transmisión de 500 kV.

Desde la perspectiva de la ingeniería del riesgo, la implantación del puente reduce la probabilidad de siniestros viales, aunque introduce un nuevo riesgo eléctrico asociado a microdescargas perceptibles, técnicamente mitigables. Por ello, el presente estudio tiene como objetivo cuantificar los campos eléctricos y magnéticos en el emplazamiento del puente, verificar su conformidad con los límites del RETIE [1] y las directrices ICNIRP [2], así como proponer medidas de mitigación y un plan de verificación metrológica conforme a IEEE Std 644-2019 [5].

Materiales y métodos

Datos geométricos y diseño civil

El puente peatonal etapa 1 presenta: (i) luz entre apoyos de 23,34 m y (ii) ancho libre del tablero de 2,45 m. La superestructura es una celosía tubular con tablero apoyado sobre pilas de altura variable y cimentación mediante pilotes tipo Caisson. El índice de planos del proyecto (K14+070) consigna localización, perfiles, geometría de apoyos y detalles de losas y rampas.

Cuadro 1. Geometría estructural relevante para el acoplamiento EM.

Parámetro	Valor
Luz entre apoyo (Etapa 1)	23,34 m
Ancho libre del tablero	2,45 m
Ubicación (Abscisa vial)	K14 + 070
Superestructura	Celosía tubular
Cimentación	Pilotes tipo Caisson (1.40 m, típico)
Planos (Códigos ejemplo)	K14 + 070- P1..P7 (Planta, perfil, secciones y detalles)

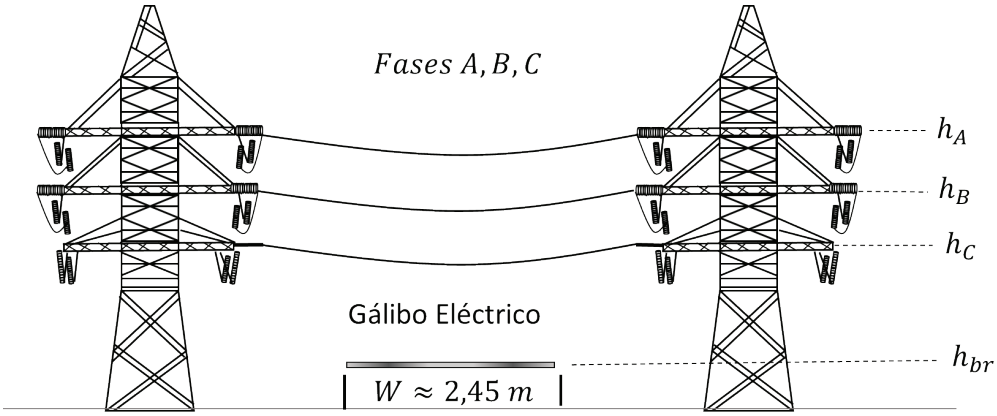


Figura 1. Esquema no a escala del cruce LT 500 kV – puente peatonal. Se indican alturas de fase h_A, h_B, h_C y altura de tablero h_{br}, gálibo eléctrico G y ancho de tablero W.

Marco normativo

La evaluación de los campos eléctricos y magnéticos en entornos con líneas de transmisión de extra alta tensión se fundamenta en el cumplimiento de normativas nacionales e internacionales. En Colombia, el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE) establece límites de exposición tanto para el público como para el personal ocupacionalmente expuesto. Para el público en general, los valores máximos permitidos son $E \leq 4{,}16$ kV/m y $B \leq 200$ µT, mientras que para personal ocupacional los límites se amplían a $E \leq 8{,}3$ kV/m y $B \leq 1000$ µT, considerando la medición a una altura de un metro sobre el nivel del suelo como criterio estándar.

Como referencia internacional, se adoptan los lineamientos de la Comisión Internacional para la Protección contra Radiaciones no Ionizantes (ICNIRP) para campos eléctricos y magnéticos de baja frecuencia (LF), asociados a la frecuencia industrial de 50/60 Hz. Dichos lineamientos proporcionan criterios de seguridad reconocidos globalmente y orientados a la protección de la salud pública frente a exposiciones prolongadas.

En cuanto a la metodología de medición, se establece que los procedimientos deben ajustarse a lo indicado en la norma IEEE Std 644-2019, la cual define prácticas recomendadas para la medición de campos eléctricos y magnéticos en líneas de transmisión de 50/60 Hz. Esta norma especifica consideraciones sobre la instrumentación, el posicionamiento de los sensores, las condiciones ambientales y la incertidumbre asociada a las mediciones, con el fin de garantizar resultados precisos y trazables.

Campo eléctrico: Coeficientes de potencial de Maxwell

En el análisis de líneas de transmisión de alta y extra alta tensión, el cálculo del campo eléctrico en las proximidades de los conductores se basa en el concepto de coeficientes de potencial de Maxwell, aplicando el método de imágenes para considerar la presencia del plano conductor (tierra ideal) [17].

Cada subconductor se modela a una altura h_i sobre el plano conductor, y para *N* hilos (considerando los reales y sus imágenes) el potencial en el conductor *i* se expresa como:

$$V_i = \sum_{j=1}^{n} P_{ij}\, q_j \tag{1}$$

Donde:

V_i es el potencial del conductor

q_j es la carga lineal del conductor

P_{ij} son los coeficientes de potencial, que dependen de la geometría de los conductores y su ubicación.

Los coeficientes se calculan como:

$$P_{ij} = \begin{cases} \dfrac{1}{2\pi\varepsilon}\ln\dfrac{2h_i}{r_i}, & i = j \\ \dfrac{1}{2\pi\varepsilon}\ln\dfrac{D'_{ij}}{D_{ij}}, & i \neq j \end{cases} \tag{2}$$

Donde:

ε es la permeabilidad del medio

h_i es la altura del conductor *i* respecto al plano de tierra

r_i es el radio del conductor

D_{ij} es la distancia horizontal entre los conductores *i* y *j*

D'_{ij} es la distancia entre el conductor *i* y la imagen del conductor *j* (en el plano tierra).

Una vez resuelto $q = P^{-1}V$, el potencial en (*x*,*y*) se obtiene por superposición y el campo eléctrico se determina como: $E = -\nabla\emptyset$. El radio equivalente (GMR) de un haz de *n* subconductores de radio r y espaciamiento d se aproxima por $GMR_{haz} = rd^{(n-1)/n}$. Este parámetro es fundamental en el cálculo de impedancia y campo eléctrico, pues refleja el efecto combinado del haz como un conductor equivalente.

Campo magnético: superposición de corrientes

El campo magnético generado por líneas de transmisión se modela a partir de la ley de Biot-Savart, la cual describe la contribución de cada elemento de corriente a un punto en el espacio. Para conductores rectilíneos de longitud infinita que transportan una corriente alterna de magnitud I_k, el campo magnético a una distancia ρ_k del conductor se determina mediante: [18],[19].

$$B(r) = \sum_k \frac{\mu_0 I_k}{2\pi\rho_k}\hat{\varphi}_k,\ B = \|B\| \tag{3}$$

Donde:

$\mu_0 = 4\pi\, x10^{-7}\mathrm{H/m}$ es la permeabilidad magnética del vacío.

I_k es la corriente en el conductor *k*.

ρ_k es la distancia perpendicular desde el punto de evaluación hasta el conductor *k*.

$\hat{\varphi}_k$ es el vector unitario tangencial al círculo centrado en el conductor (Dirección azimutal)

En el caso de líneas trifásicas, cada conductor contribuye con un campo magnético cuya dirección y magnitud varían en función de la posición espacial y la fase eléctrica. La superposición vectorial de estas contribuciones determina el campo magnético neto en el punto de interés.

Microdescargas: Modelo electromagnético y evaluación cuantitativa

Las microdescargas (o microchoques) ocurren cuando una persona eléctricamente aislada del suelo se encuentra inmersa en un campo eléctrico de frecuencia industrial (50/60 Hz), adquiriendo por inducción un potencial corporal que se descarga al establecer contacto con un objeto conectado a tierra. Este fenómeno es relevante en zonas cercanas a líneas de transmisión de alta tensión, especialmente bajo estructuras metálicas como puentes peatonales, debido a la interacción entre el campo eléctrico y el cuerpo humano.

El potencial corporal inducido depende de la interacción entre el campo eléctrico externo y el acoplamiento capacitivo existente entre el cuerpo humano, los conductores energizados y la tierra. Diversos estudios sobre exposición humana a campos eléctricos de frecuencia industrial indican que la capacitancia entre el cuerpo y la línea, junto con la capacitancia cuerpo–tierra, determina los niveles de voltaje inducido sobre una persona expuesta a líneas de transmisión de alta tensión. [20]-[23]

En un campo eléctrico *E* de 50/60 Hz, una persona eléctricamente aislada respecto de tierra adquiere por inducción un potencial corporal efectivo V_b:

$$V_b \approx \kappa E h_{ef} \tag{4}$$

Donde:

E es la intensidad del campo eléctrico (kV/m).

h_{ef} es la altura efectiva del cuerpo respecto a tierra (aprox. 1 m para una persona de pie).

k es un coeficiente que depende de la postura, vestimenta/calzado y humedad (rango típico: 0,3 a 0,7). Este potencial se genera por la capacitancia efectiva cuerpo-tierra (C_b), que suele estar entre 100 y 200 pF.

La carga inducida es $Q = C_b V_b$ y la energía máxima liberable al tocar un objeto a tierra es:

$$\varepsilon = \frac{1}{2} C_b V_b^2 = \frac{1}{2} C_b (k E h_{ef})^2 \tag{5}$$

Para el caso evaluado $(E \approx 3{,}12\,\mathrm{kV/m}, h_{ef} \approx 1\mathrm{m}, C_b \approx 150\,\mathrm{pF})$ resulta $\varepsilon \approx 0{,}73\,\mathrm{mJ}$ para k = 1, el cual se encuentra dentro del rango típico para microdescargas perceptibles (0,12 a 0,26 mJ para *k* entre 0,4 y 0,6), lo que confirma que pese a ser perceptible, no representa un riesgo significativo para la salud, según los criterios normativos internacionales. La intensidad de pico $i(0^+) = V_b/R_{eq}$ y la rapidez $\tau = R_{eq}C_b$ dependen de la impedancia de contacto; Debido a que se trata de una descarga capacitiva de muy baja energía, no es comparable con una electrocución, que implica contacto con baja impedancia y energía sostenida.

Resultados

La distribución transversal *B*(*x*) a 1 m del suelo presenta un máximo bajo el eje del vano (x ≈ 0) y decrece simétricamente hacia los bordes de la servidumbre. Para la corriente de operación I = 2 kA se obtiene $B_{máx} \approx 20{,}87\,\mu\text{TB}$ mientras que para la condición de emergencia térmica I = 4083 A el máximo asciende a $B_{máx} \approx 42{,}24\,\mu\text{TB}$. Ambos valores se sitúan por debajo del límite para público del RETIE/ICNIRP $(B \leq 200\,\mu\text{TB})$ y conservan amplio margen frente al límite ocupacional $(B \leq 1000\,\mu\text{TB})$. La razón de seguridad frente al criterio de público en el peor caso (emergencia) es 200/42,24 ≈ 4,7, y respecto al criterio ocupacional es 100/42,24 ≈ 23,7. En cuanto al campo eléctrico, el máximo calculado $E_{máx} \approx 3{,}12\,\text{kV/m}$ también cumple el límite para público $E \leq 4{,}16\,\text{kV/m}$, con una razón de seguridad aproximada de 4,16/3,12 ≈ 1,33. Adicionalmente, el modelo electromagnético de microdescargas predice una energía inducida de aproximadamente 0,73 mJ (para un coeficiente κ = 1), considerando un campo eléctrico de 3,12 kV/m, una altura efectiva de 1 m y una capacitancia corporal promedio de 150 pF. Este valor corresponde a un fenómeno perceptible y molesto, pero no peligroso para las personas.

En las figuras 2 y 3 se ilustran perfiles transversales (datos sintéticos consistentes con los máximos; reemplazables por datos de simulación o campo).

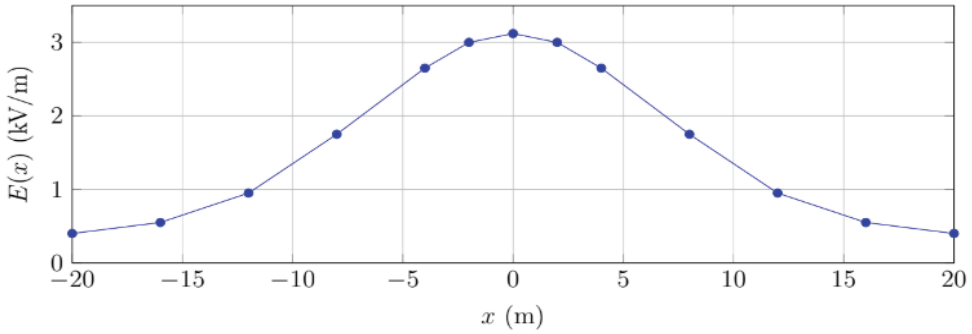


Figura 2. Perfil típico de E(x) a 1 m sobre el suelo bajo el vano (sintético).

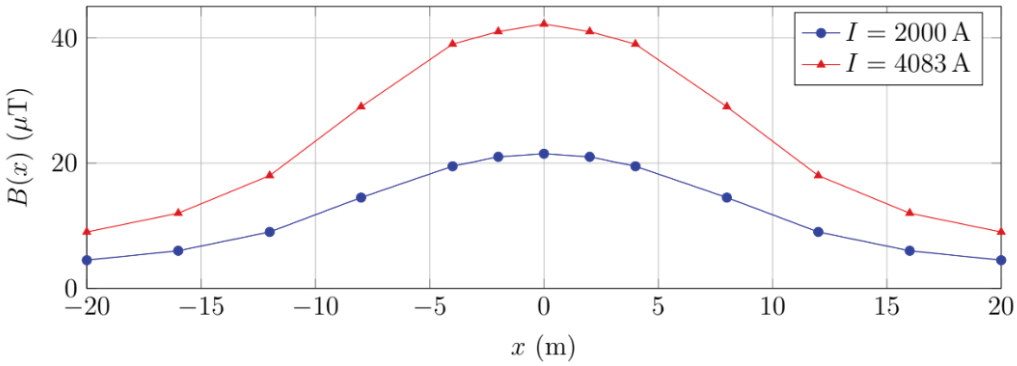


Figura 3. Perfiles de B(x) a 1 m para dos niveles de corriente (sintéticos).

Adicionalmente, la evaluación de microdescargas bajo condiciones de campo eléctrico ($E \approx 3{,}12$ kV/m) y altura efectiva ($h_{ef} \approx 1$m) evidencia que la energía acumulada en el cuerpo $\frac{1}{2}C_b(\kappa E h_{ef})^2$ permanece constante para valores típicos de capacitancia corporal ($C_b \approx 150$ pF) y factores $\kappa \in [0{,}4\text{-}1]$. Sin embargo, el pico de corriente $i(0^+) = V_b/R_{eq}$ y la constante de tiempo τ dependen significativamente del aislamiento (R_{eq}).

La figura 4 muestra que el incremento de R_{eq} en uno o más órdenes de magnitud (mediante recubrimientos dieléctricos en pasamanos) reduce el pico de corriente desde valores del orden de 10^{-1} A (condiciones sin aislamiento) hasta 10^{-4} A, mitigando la percepción de microchoques. Asimismo, la figura 5 indica que la constante de tiempo aumenta proporcionalmente a R_{eq}, pasando de τ ≈ 15 µs ($R_{eq} = 10^4\,\Omega$) a τ ≈ 75 µs ($R_{eq} = 10^4\,\Omega$) lo que suaviza la descarga y reduce su brusquedad. Estos resultados justifican la estrategia combinada de equipotencialización integral (reducción de gradientes y voltajes de toque) y aislamiento de pasamanos (incremento de impedancia serie). Esta mitigación es consistente con los requisitos de IEEE Std 81 para sistemas de puesta a tierra y con las recomendaciones de IEEE Std C95.3 en relación con seguridad del público.

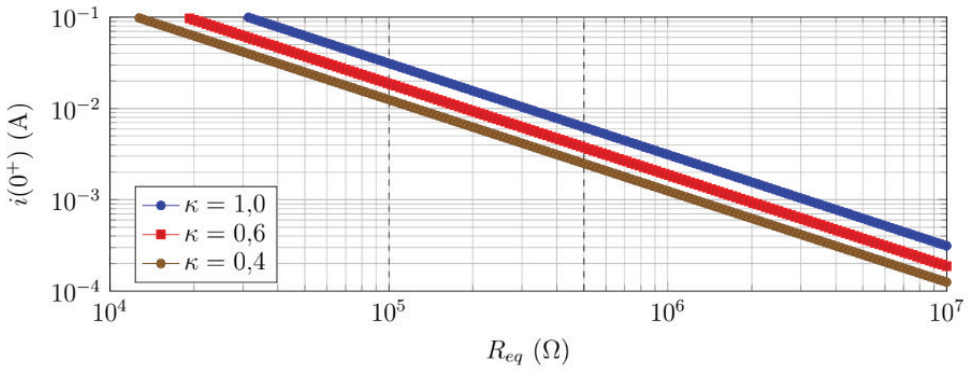


Figura 4. Pico de corriente $i(0+) = V_b/R_{eq}$ para $E = 3{,}12$ kV/m, $h_{ef} = 1$m. Aumentar R_{eq} (aislamiento de pasamanos) reduce el pico en varios órdenes.

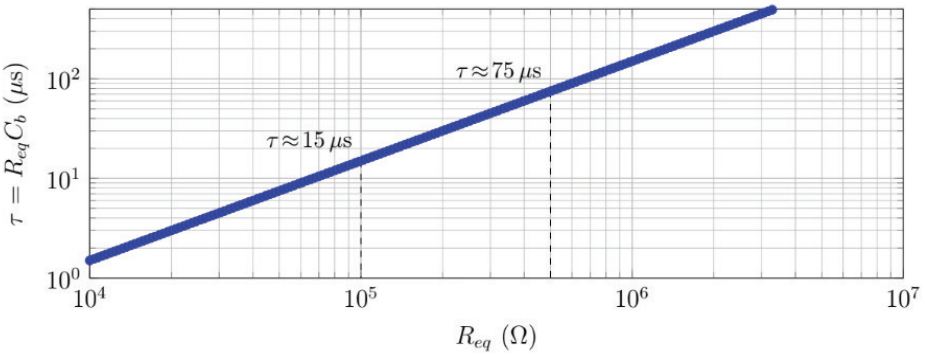


Figura 5. Constante de tiempo con $C_b = 150$ pF. El aislamiento R_{eq} (mayor) alarga la descarga y disminuye su brusquedad.

Medida de mitigación y seguridad

El objetivo principal de las medidas de mitigación es reducir la exposición del público y del personal ocupacional a campos eléctricos *E* y magnéticos *B*, así como minimizar los gradientes de potencial y garantizar la seguridad frente a descargas eléctricas. Estas estrategias se fundamentan en la relación entre la energía almacenada $\varepsilon = \frac{1}{2} C_b V_b^2$ y el modelo de potencial $V_b = \kappa E h_{ef}$, orientándose a: (i) minimizar los valores locales de campo eléctrico y gradientes de potencial, (ii) reducir el coeficiente de acoplamiento mediante equipotencialidad, (iii) incrementar la impedancia serie en contactos accesibles y (iv) garantizar una puesta a tierra efectiva que facilite el drenaje de cargas.

En la evaluación del campo magnético, la variación de *B*(*x*) con respecto a la distancia mostró un valor máximo de 36.2 μT en la proximidad de la estructura, disminuyendo progresivamente con la distancia. Este valor se encuentra por debajo del límite de exposición ocupacional establecido por ICNIRP (≈ 170 μTpara 50/60 Hz), lo que representa un factor de seguridad aproximado de 4.7. Esta diferencia asegura que las medidas propuestas no solo cumplen con las normativas, sino que ofrecen un margen de seguridad considerable frente a variaciones operativas y condiciones ambientales adversas.

Con base en los resultados obtenidos y en los requerimientos de normas internacionales (RETIE, ICNIRP, IEEE 81, IEC 61786-2), se establecen las siguientes medidas de mitigación y control:

1. Equipotencialización integral

Se implementa la conexión equipotencial de barandas, estructuras metálicas y perfiles secundarios mediante barras de unión y bajantes, formando una red con baja impedancia de lazo (Z_{loop}). Esta medida limita el voltaje de toque (V_{touch}) en trayectorias accesibles, verificándose su cumplimiento mediante la medición de continuidad y resistencia según IEEE 81.

2. Puesta a tierra de la estructura

Se instalan múltiples bajantes conectados a una red de tierra con baja impedancia (Z_g), ajustada a la resistividad del terreno mediante el método Wenner/Schlumberger. Un valor reducido de Z_g disminuye la elevación del potencial estructural en condiciones de falla o acoplamiento.

3. Aislamiento de pasamanos y superficies accesibles

Se emplean recubrimientos con rigidez dieléctrica superior a 1 kV y se realizan ensayos de resistencia de aislamiento (IR) alrededor de 1 kV DC. Esta técnica añade impedancia serie, reduciendo la corriente inicial $i(0+) = V_b/R_{eq}$ sin incrementar la energía almacenada.

4. Control de elementos temporales y auxiliares

Todo componente metálico temporal debe conectarse a la red equipotencial y a tierra, evitando estados flotantes que incrementen el riesgo de microdescargas o tensiones peligrosas.

5. Gestión operativa y ambiental

Las actividades de mantenimiento se programan evitando condiciones de baja humedad relativa y viento seco que aumenten la constante κ. Se promueve el contacto firme (sin fricción) y aproximaciones lentas, junto con señalización y capacitación para prevenir microdescargas.

6. Criterios de aceptación

Los niveles máximos de campo eléctrico y magnético a 1 m de la estructura deben cumplir:

a. $E_{máx}$, $B_{máx}$ por debajo de los límites establecidos por ICNIRP y RETIE (IEEE 644, IEC 61786-2).
b. Continuidad equipotencial sin discontinuidades.
c. Valores de Z_g y Z_{loop} homogéneos y bajos.
d. Pasamanos con resistencia de aislamiento adecuada.
e. Diferencia de potencial (ΔV) no peligrosa en zonas accesibles (IEC 60479-1).

Estas medidas, combinadas con un monitoreo periódico y el cumplimiento de los criterios normativos, garantizan la protección frente a descargas eléctricas, la reducción de gradientes de potencial peligrosos y el mantenimiento de campos electromagnéticos dentro de márgenes seguros.

Discusión

Los resultados obtenidos son consistentes con los reportados por Ahsan et al. [14], quienes realizaron una comparación entre modelos matemáticos y simulaciones computacionales para la evaluación del campo eléctrico bajo líneas aéreas de transmisión de 400 kV. Los autores demostraron que la máxima intensidad del campo eléctrico se presenta bajo el eje de los conductores y disminuye progresivamente con la distancia lateral, comportamiento similar al observado en el presente estudio. Asimismo, identificaron que la altura de los conductores y la configuración geométrica de la línea constituyen variables determinantes en la reducción de la exposición electromagnética. Estos hallazgos respaldan la metodología empleada y confirman que, bajo condiciones adecuadas de diseño, los niveles de campo eléctrico pueden mantenerse dentro de los límites establecidos por los estándares internacionales de seguridad. De igual manera, los valores encontrados son comparables con los reportados por Boudjella et al. [12] en sistemas de transmisión de alta tensión, donde los niveles de campo magnético permanecieron significativamente por debajo de los límites internacionales de exposición humana.

En relación con la percepción del riesgo, los resultados obtenidos coinciden con las observaciones de Rezaian [15], quien señala que los principales desafíos asociados a las infraestructuras ubicadas cerca de líneas de transmisión no siempre se derivan de riesgos físicos directos, sino de la percepción pública de inseguridad y de la necesidad de implementar medidas de mitigación visibles. En este sentido, aunque los campos eléctricos y magnéticos calculados en el presente estudio se mantienen por debajo de los límites establecidos por RETIE e ICNIRP, la aplicación de estrategias como la equipotencialización, la puesta a tierra y el aislamiento de superficies accesibles resulta fundamental para reducir la percepción de riesgo y fortalecer la aceptación social de la infraestructura. Asimismo, estos resultados respaldan los planteamientos de Boukabou y Kaabouch [20], quienes destacan que la adecuada gestión de las distancias de seguridad, la implementación de sistemas efectivos de puesta a tierra y el control de estructuras metálicas permiten garantizar condiciones seguras de operación incluso en entornos con líneas de transmisión de extra alta tensión.

En conjunto, los resultados obtenidos evidencian que la coexistencia entre infraestructura vial y líneas de transmisión de 500 kV puede ser técnicamente viable cuando se aplican medidas de mitigación adecuadas y se verifica el cumplimiento de los estándares internacionales de exposición electromagnética.

Limitaciones del estudio

El presente estudio presenta algunas limitaciones que deben considerarse en la interpretación de los resultados. En primer lugar, los análisis se realizaron mediante modelos electromagnéticos basados en parámetros geométricos y eléctricos representativos de la línea de transmisión, sin incluir mediciones experimentales en campo durante diferentes condiciones operativas.

En segundo lugar, las simulaciones se desarrollaron considerando condiciones atmosféricas normales, por lo que no se evaluó el efecto de variables ambientales extremas como lluvias intensas, descargas atmosféricas o variaciones significativas de humedad relativa.

Adicionalmente, el análisis se centró en una configuración específica de línea de transmisión de 500 kV y un único diseño de puente peatonal, por lo que la extrapolación de los resultados a otras configuraciones debe realizarse con precaución.

Finalmente, la evaluación de las microdescargas se basó en modelos teóricos de acoplamiento capacitivo y no incluyó pruebas experimentales con usuarios reales. Investigaciones futuras podrían incorporar campañas de medición en campo y estudios de percepción del riesgo para complementar los resultados obtenidos.

Conclusiones

Los resultados evidencian que el campo eléctrico máximo (kV/m) y el campo magnético máximo (μT) bajo la línea de transmisión de 500 kV se mantienen por debajo de los límites establecidos por RETIE e ICNIRP para exposición del público. La energía asociada a microdescargas (mJ) confirma que, aunque perceptible, no representa un riesgo significativo para la salud, pero sí demanda estrategias para garantizar confort y aceptación social. Las medidas de mitigación propuestas —equipotencialización, puesta a tierra, aislamiento de superficies y gestión operativa— aseguran márgenes de seguridad superiores a los normativos. En consecuencia, la coexistencia entre la infraestructura vial y la línea de transmisión es viable desde el punto de vista electromagnético, siempre que se apliquen las acciones preventivas definidas y se mantenga un plan de verificación periódica conforme a IEEE 644-2019.

Referencias

[1] Ministerio de Minas y Energía, *Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE)*, Bogotá, Colombia: Ministerio de Minas y Energía, 2024. [Online]. Available: https://www.minenergia.gov.co

[2] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection ICNIRP, “Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz),” *Health Physics*, vol. 118, no. 2, pp. 133–186, 2020.

[3] IEEE, *IEEE Recommended Practice for Measurements and Computations of Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields with Respect to Human Exposure to Such Fields*, IEEE Std C95.3-2021, 2021.

[4] IEEE Power & Energy Society, *IEEE Standard for Calculating the Current Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors*, IEEE Std 738-2018, 2018.

[5] IEEE, *IEEE Standard Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields from AC Power Lines*, IEEE Std 644-2019, 2019.

[6] S. G. Caliskan, M. A. Kilic, D. B. Ilhan, *et al.*, “Evaluation of Electromagnetic Field Levels and Student Exposure at Aydın Adnan Menderes University Central Campus,” *GU J Sci, Part A*, vol. 9, no. 3, pp. 314–322, 2022, doi: 10.54287/gujsa.1151793

[7] H. Tian *et al.*, “System-level biological effects of extremely low-frequency electromagnetic fields: an in vivo experimental review,” *Front. Neurosci.*, vol. 17, 1247021, 2023, doi: 10.3389/fnins.2023.1247021

[8] L. Liu, B. Huang, Y. Lu, Y. Zhao, X. Tang, y Y. Shi, “Interactions between electromagnetic radiation and biological systems,” *iScience*, vol. 27, no. 3, art. 109201, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.isci.2024.109201

[9] D. Schuermann y M. Mevissen, "Manmade Electromagnetic Fields and Oxidative Stress—Biological Effects and Consequences for Health," *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 22, no. 7, p. 3772, 2021, doi: 10.3390/ijms22073772

[10] A. Hirata *et al.*, "Human exposure assessment to electromagnetic fields: Review and future directions," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 63, no. 5, pp. 1619–1630, Oct. 2021, doi: 10.1109/TEMC.2021.3109249

[11] B. Levitt, H. C. Lai, y A. M. Manville, "Effects of non-ionizing electromagnetic fields on flora and fauna, Part 2 impacts: how species interact with natural and man-made EMF," *Reviews on Environmental Health*, vol. 37, no. 3, pp. 327–406, 2022, doi: 10.1515/reveh-2021-0050

[12] H. Boudjella, A. N. E. I. Ayad, T. Rouibah, B. Larouci, T. A. H. Alghamdi, A. Althobaiti, S. M. Ghoneim, y A. S. Tayeb, "Magnetic field evaluation around 400 kV underground power cable under harmonics effects," *Diagnostyka*, vol. 23, no. 2, pp. 2022209, 2022, doi: 10.29354/diag/150068

[13] H. Ahmadi, S. Mohseni, y A. S. Akmal, "Electromagnetic fields near transmission lines – problems and solutions," *Journal of Environmental Health Science & Engineering*, vol. 7, no. 2, 2010. [Online]. Available: https://ijehse.tums.ac.ir/index.php/jehse/article/view/246/245

[14] M. Ahsan, M. N. R. Baharom, I. U. Khalil, y Z. Zainal, "Comparative analysis of mathematical and simulation models for electric field generated beneath 400 kV overhead transmission lines," *Measurement*, vol. 256, Part E, 118566, 2025, doi: 10.1016/j.measurement.2025.118566

[15] S. Rezaian, "Environmental, health, and safety risks of the power lines nearby the human settlements," *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, vol. 22, no. 8, pp. 1696–1707, 2016, doi: 10.1080/10807039.2016.1218272

[16] Y. Hu, Y. Ding, y S. Zhang, "Reliability Assessment of Transmission Lines Considering Extreme Weather Conditions and Human Factors," *IEEE PES General Meeting*, Atlanta, GA, USA, pp. 1–5, 2019, doi: 10.1109/PESGM40551.2019.8974118

[17] J. Arrillaga y C. P. Arnold, *Computer Analysis of Power Systems*. Chichester, U.K.: Wiley, 2000.

[18] M. N. O. Sadiku, *Elements of Electromagnetics*, 8th ed., New York, NY, USA: Oxford Univ. Press, 2021.

[19] W. H. Hayt y J. A. Buck, *Engineering Electromagnetics*, 9th ed., New York, NY, USA: McGraw-Hill Education, 2019.

[20] I. Boukabou y N. Kaabouch, "Electric and magnetic fields analysis of the safety distance for UAV inspection around extra-high voltage transmission lines," *Drones*, vol. 8, no. 2, p. 47, 2024, doi: 10.3390/drones8020047

[21] A. Fereidouni, B. Vahidi, F. Shishehgar, T. Hosseini Mehr, and M. Tahmasbi, "Human body modeling in the vicinity of high voltage transmission lines," Sci. Int. (Lahore), vol. 26, no. 3, pp. 1017–1031, Jul.–Aug. 2014. [Online]. Available: https://www.sci-int.com/pdf/636639079391724013.pdf

[22] C. Aliau-Bonet and R. Pallàs-Areny, "A novel method to estimate body capacitance to ground at mid frequencies," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 62, no. 9, pp. 2519–2525, Sept. 2013, doi: 10.1109/TIM.2013.2258240

[23] International Electrotechnical Commission (IEC), *Effects of Current on Human Beings and Livestock – Part 1: General Aspects*, IEC 60479-1:2018, 1st ed. Geneva, Switzerland: IEC, Dec. 2018.

Declaración sobre el uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores declaramos haber utilizado ChatGPT-4o para múltiples tareas: la revisión gramatical y de estilo y el apoyo en la estructura y redacción. Todos los resultados e información asistidos por IA fueron revisados, verificados y validados minuciosamente por los autores, quienes asumen plena responsabilidad por la precisión, coherencia e integridad del contenido publicado.

Beneficios del cannabidiol proveniente de *Cannabis sativa* sobre enfermedades neurodegenerativas: una revisión sobre su implementación en la medicina moderna

Benefits of cannabidiol from *Cannabis sativa* on neurodegenerative illnesses: a review on its implementation in modern medicine

Alessandra María Le-Roy-Cáceres[1], Mattias Aguilera-Pogue[2], Sofía Montero-Yee[3], Lucía Ramírez-Hidalgo[4], Helena Soto-Pacheco[5]

Fecha de recepción: 4 de diciembre, 2025
Fecha de aprobación: 13 de abril, 2026

Le-Roy-Cáceres, A.M; Aguilera-Pogue, M; Montero-Yee, S; Ramírez-Hidalgo, L; Soto-Pacheco, H. Beneficios del cannabidiol proveniente de *Cannabis sativa* sobre enfermedades neurodegenerativas: una revisión sobre su implementación en la medicina moderna. *Tecnología en Marcha*. Vol. 39 Nº 4. Octubre-Diciembre, 2026. Pág. 32-40.

https://doi.org/10.18845/tm.v39i4.8329

1 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
a.leroy.1@estudiantec.cr
https://orcid.org/0009-0007-8421-2519
2 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
m.aguilera.1@estudiantec.cr
https://orcid.org/0009-0001-8692-4030
3 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
s.montero.3@estudiantec.cr
https://orcid.org/0009-0005-5362-5391
4 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
l.ramirez.2@estudiantec.cr
https://orcid.org/0009-0004-9450-6340
5 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
h.soto.1@estudiantec.cr
https://orcid.org/0009-0005-1190-4923

Palabras clave

Sistema nervioso; Alzheimer; Parkinson; demencia; antioxidantes; sistema de endocannabinoides.

Resumen

El cannabidiol es uno de los compuestos más abundantes de la *Cannabis sativa*, y es sumamente importante debido a su alto potencial medicinal, especialmente en referencia a las enfermedades neurodegenerativas. A través de su intervención fisiológica realizada por medio del sistema endocannabinoide y sus propiedades antioxidantes, es capaz de prevenir fenómenos como la apoptosis neuronal, y asistir con el manejo de los síntomas más prevalentes, como la inflamación, dolor y acumulación de compuestos secundarios tóxicos, de enfermedades como el Alzheimer, el Parkinson y la Demencia. Por otra parte, la biodisponibilidad, los efectos adversos y las creencias personales corresponden a factores que dificultan la implementación del CBD en medicamentos. Finalmente, a pesar de que el CBD presenta amplios beneficios, se deben mejorar las vías de administración, la mitigación de efectos secundarios indeseados, y cambiar la percepción social sobre el uso medicinal de *Cannabis sativa* para facilitar su implementación como tratamiento regular de enfermedades neurodegenerativas.

Keywords

Nervous system; Alzheimer's Disease; Parkinson's Disease; dementia; antioxidants; endocannabinoid system

Abstract

Cannabidiol is one of the most abundant compounds of *Cannabis sativa*, and it's extremely important due to its high medical potential, especially in reference to neurodegenerative illnesses. Through physiological intervention carried out by the endocannabinoid system and its antioxidant properties, it's able to prevent phenomena such as neuronal apoptosis, and its able to assist with the management of the most prevalent symptoms, namely inflammation, pain and accumulation of toxic secondary compounds, of illnesses such as Alzheimer's Disease, Parkinson's Disease and Dementia. On the other hand, bioavailability, adverse effects, and personal beliefs correspond to factors that make the implementation of CBD in medications difficult. Finally, despite the fact that CBD presents ample benefits, it's necessary to improve administration routes, the mitigation of unwanted side effects, and to change the social perception of the medical use of *Cannabis sativa* in order to allow the implementation of CBD as a regular treatment for neurodegenerative illnesses.

Introducción

Cannabis sativa posee una gran variedad y complejidad de compuestos químicos, algunos de los cuales presentan alto valor medicinal. A pesar de esto, su uso ha sido controversial a lo largo de los años, tanto dentro de la población general como entre los proveedores de salud [1 - 5]. Dentro de los fitoquímicos de *C. sativa* se encuentran los cannabinoides, terpenos, flavonoides, esteroides, alcaloides y lignanos, los cuales están vinculados a su potencial medicinal. Algunos factores como los quimiovares, los factores geográficos, el medio de cultivo y el método de cruzamiento adoptado influyen en la abundancia de estos compuestos en la planta de cannabis [6].

A su vez, los principales compuestos en *C. sativa* son los cannabinoides, los cuales son moléculas orgánicas polifenólicas y han sido los más estudiados por sus interacciones farmacodinámicas con el receptoma humano [7]. En adición, uno de los fitocannabinoides más abundantes es el cannabidiol (CBD), que consiste en una molécula formada por un esqueleto tetrahidrobifenílico, compuesto a su vez por un núcleo bicíclico de p-cimeno y olivetol [8]. Además, este compuesto no posee potencial de abuso, presenta una baja toxicidad relativa y se considera seguro incluso cuando se administra en altas dosis, ya que no altera parámetros cardiovasculares, temperatura corporal ni otras funciones fisiológicas relevantes [9-11]. No obstante, cabe recalcar que algunos estudios han reportado distintos efectos adversos [12].

Por otra parte, las enfermedades neurodegenerativas involucran trastornos neurológicos que desembocan en la degeneración neuronal del sistema nervioso central o el sistema nervioso periférico [13]. Esta degeneración tiene diferentes causas como lo son mutaciones genéticas, acumulación de proteínas anormales, inflamación y estrés oxidativo, los cuales se encuentran estrechamente relacionados con el envejecimiento [14][15]. Estos defectos neurológicos conducen a un deterioro en el comportamiento, funciones motrices, memoria, entre otros trastornos [13]. Se ha visto una tendencia en aumento para la prevalencia de las enfermedades neurodegenerativas: en el 2019 alrededor de 50 millones de personas padecían algún tipo de estos trastornos, y se estima que para 2060 habrá 152 millones de individuos afectados [14]. Algunas de las enfermedades más comunes en esta clasificación son el Parkinson, el Alzheimer y el Trastorno Neurocognitivo Mayor, y con mayor riesgo para adultos mayores, por lo que la investigación de tratamientos médicos aplicables a este grupo es de interés [16].

Por otro lado, el sistema endocannabinoide (SEC) participa en la regulación del sistema inmune de las enfermedades neurodegenerativas, siendo capaces de generar un efecto neuroprotector ante factores como inflamación y estrés oxidativo [17]. Los receptores endocannabinoides del SEC están presentes en el sistema nervioso central y periférico humano, por lo que los fitocannabinoides de *C. sativa* que interactúan con dichos receptores son de interés para potenciales intervenciones de estas patologías [18].

Debido a la alta prevalencia en las enfermedades neurodegenerativas, se revisó literatura disponible sobre la interacción del CBD con el SEC, así como los beneficios y retos de su uso para la modulación de enfermedades neurodegenerativas.

Metodología

Se realizó una revisión bibliográfica de literatura científica sobre los beneficios del CBD derivado de *C. sativa* en enfermedades neurodegenerativas. Para ello se utilizaron las bases de datos de PubMed, ScienceDirect, Scopus, Web of Science, Frontiers, Springer Nature, Sage Journals, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, IMR Press y Wiley Online Library. Además, se emplearon términos de búsqueda, tanto en español como en inglés, mediante los siguientes operadores booleanos: (“Cannabidiol” OR “CBD”) AND (“Alzheimer’s disease”), (“Cannabidiol” OR “CBD”) AND (“Parkinson’s disease”), (“Cannabidiol” OR “CBD”) AND (“Dementia” OR “Major neurocognitive disorder”), (“Cannabidiol” OR “CBD”) AND (“Endocannabinoid system”), (“Cannabidiol” OR “CBD”) AND (“Bioavailability” OR “Pharmacokinetics”), (“Cannabidiol” OR “CBD”) AND (“Adverse effects” OR “Toxicity” OR “Safety”), (“Cannabidiol” OR “CBD”) AND (“Antioxidant activity” OR “Oxidative stress” OR “Reactive oxygen species” OR “ROS”) y (“Cannabidiol” OR “CBD”) AND (“Therapeutic effects” OR “Therapeutic potential” OR “Beneficial effects” OR “Neuroprotective effects” OR “Treatment”).

Como criterios de inclusión, se consideraron publicaciones comprendidas en el periodo de 2020 a 2025, disponibles en inglés o español. Asimismo, se incluyeron artículos de revisión narrativa, sistemática y metaanálisis, estudios experimentales *in vitro*, estudios observacionales, y literatura clínica relacionada con el CBD, mecanismos de acción, potencial neuroprotector y aplicación en enfermedades neurodegenerativas.

Interacción del CBD con el SEC

Como se mencionó anteriormente, el SEC se relaciona con la neuroprotección a través de diversos mecanismos. En general, el CBD se considera un regulador alostérico [19] y no tiene una afinidad fuerte a los receptores de cannabinoides tipo 1 (CB1) o tipo 2 (CB2), sino que modula el SEC a través de la inhibición de las enzimas que participan en la degradación de la anandamida, la cual es un lípido de señalamiento que participa en procesos de antiinflamación, neurotransmisión, estrés, entre otros [20]. Esta degradación de enzimas permite la acumulación de anandamida y mejora la señalización endocannabinoide. Adicionalmente, el CBD interactúa con otros receptores, como los de serotonina (5-HT) y vanilloide (TRPV1). Esto permite que disminuya la sensibilidad al dolor y la inflamación [19], contribuyendo a su potencial terapéutico sin causar efectos psicoactivos.

Actividad antioxidante

Un factor relevante al discutir los potenciales beneficios del CBD sobre las enfermedades neurodegenerativas son las especies reactivas de oxígeno (ERO o ROS, por sus siglas en inglés) y su comportamiento como radicales libres. Las ERO son capaces de producir daños en el ADN, proteínas y mitocondrias, factores estrechamente relacionados en la génesis de enfermedades neurodegenerativas [21][22]. Esto se debe a que, componentes del sistema nervioso central y periférico, como las neuronas y las células gliales, requieren una alta demanda energética y presentan una baja regeneración, lo que las hace susceptibles a eventos de oxidación [21].

El CBD podría ser una gran herramienta para la prevención y tratamientos de este tipo de padecimientos: tiene la capacidad de neutralizar radicales libres y reducir iones metálicos, por lo que esta naturaleza antioxidante comparable a la de la vitamina E [23] le permite actuar como protector frente a eventos de oxidación [8]. Adicionalmente, puede inhibir la peroxidación de lípidos, lo que impide la apoptosis de neuronas mediada por caspasas [23]. Es así como el CBD puede mitigar el impacto de las ERO y actuar como un compuesto neuroprotector, sin embargo, el estrés oxidativo no es la única causa de las enfermedades neurodegenerativas, ya que factores como la genética, inflamación, procesos sinápticos, y otros, propician su desarrollo [13]. Por consiguiente, es necesario analizar individualmente las enfermedades y discutir los posibles beneficios del CDB en cada una.

Efectos del CBD en el Alzheimer

La enfermedad de Alzheimer se caracteriza por un declive en la capacidad de pensar, la memoria y la realización de actividades cotidianas. Se relaciona a estrés oxidativo en el cerebro e inflamación, además de la acumulación del péptido beta-amiloide y proteína tau [15]. Por lo tanto, el CBD puede llegar a tener un efecto beneficioso para tratar esta enfermedad.

Por su parte, el mecanismo de acción que se asocia con el CBD para tratar el Alzheimer es su interacción con el receptor activado por el proliferador de peroxisomas gamma (PPAR-γ) [24]. Dicho receptor ayuda a bajar la inflamación y proteger neuronas y puede ser activado por el

CBD. Asimismo, este compuesto reduce los niveles de la proteína precursora del beta-amiloide mediante su ubiquitinización y evita la muerte de neuronas por acumulación de estos fragmentos proteicos (beta-amiloide) [25]. Además, la interacción de este compuesto con PPAR-γ también le otorga la capacidad de reducir la hiperfosforilación de la proteína tau al promover la inhibición de la enzima Glucógeno Sintasa Quinasa 3β [26], tal como se demostró utilizando células PC12 [27]. Esto comprende un beneficio ya que, en condiciones anormales esta adición de fosfato puede formar agregados tóxicos [24] conocidos como ovillos neurofibrilares, que interrumpen el transporte de nutrientes y provocan senescencia neuronal [26].

Similarmente, otros efectos que tiene el CBD por medio de la activación del PPAR-γ son la reducción de moléculas inflamatorias, como el óxido nítrico, TNF-α, y IL-1β en astrocitos, efecto que se ha demostrado en ratas. También evita la sobreactivación de células gliales y bloquea el factor nuclear Kappa B, que puede activar genes asociados a la inflamación [25]. De esta forma, el CBD puede presentar beneficios para personas con Alzheimer, ya que actúa directamente sobre enzimas y compuestos que se asocian con el desarrollo y progreso de la enfermedad.

Efectos del CBD en el Parkinson

Por otro lado, el Parkinson es la segunda enfermedad neurodegenerativa más común. Se asocia a dificultades motoras, tales como temblores, rigidez e inestabilidad en la postura, pero también puede tener síntomas no motores que disminuyen la calidad de vida de los afectados [28]. En modelos animales se ha visto que el CBD tiene un efecto neuroprotector y antioxidante, y en pruebas con humanos se encontró que con una dosis diaria de 20 mg/kg por 15 días, la intensidad de los síntomas se redujo en 17,8% y el impedimento físico en 24,7%. Asimismo, se mejoraron aspectos en otras áreas, como la cantidad de horas de sueño, la regulación de emociones y las habilidades motoras finas [29].

La enfermedad se debe a la degradación de neuronas dopaminérgicas, que se encargan de la producción de dopamina, el cual es un neurotransmisor que regula el movimiento [30]. Por lo anterior, como tratamiento se utilizan levodopa y CARBI-DOPA (dopamina); no obstante, tienen efectos secundarios como náuseas, agitación y movimientos involuntarios anormales, conocidos como discinesias [31][32]. De esta manera, el CBD surge como alternativa para controlar estos movimientos: en conjunto con la capsazepina e interactuando con y TRPV1, el CB1 reduce drásticamente las discinesias [25].

Asimismo, este cannabinoide puede interactuar con el receptor 5-HT1A, que se encarga de liberar compuestos necesarios para regular procesos en el sistema nervioso, y así contrarrestar el síntoma de catalepsia en la enfermedad de Parkinson. Por otro lado, es antagonista de la proteína GPR55, la cual en exceso puede ocasionar daño neuronal y contribuir al daño ya ocasionado en el Parkinson [33]. Por lo tanto, es posible que el CBD sea ventajoso para personas con el Síndrome de Parkinson para control de síntomas y mitigación de daño neuronal.

Efectos del CBD en el Trastorno Neurocognitivo Mayor

La demencia, ahora conocida como Trastorno Neurocognitivo Mayor, consiste en un declive en la memoria y habilidades cognitivas que impacta la capacidad de realizar actividades cotidianas; también puede resultar en comportamientos bruscos. Es un síndrome progresivo, en el cual la persona afectada no está consciente de su pérdida de habilidades, por lo que se relaciona estrechamente con el Alzheimer [34].

S. Pautex y colaboradores [35] evaluaron el efecto de un tratamiento compuesto por CBD y delta-9-tetrahidrocannabinol (THC) en pacientes polimedicados que sufrían de demencia. El estudio no reportó efectos adversos, severos y determinó que los cannabinoides pueden

ser utilizados de forma segura a largo plazo, mejorando el comportamiento de los pacientes y su receptividad a recibir ayuda de sus cuidadores. El estudio encontró además cierta desaceleración en la actividad de enzimas pertenecientes a los citocromos, pero esto puede ser efecto de la combinación entre los cannabinoides o solo del THC.

Otro estudio, realizado por F. Bianchi y colaboradores [36], aborda tanto el comportamiento como la regulación de dolor en pacientes con demencia, apreciando nuevamente un comportamiento más dócil y menos expresión de dolor en pacientes al administrar un aceite oral de CBD/THC. Esta investigación también notó reducción de actividad en enzimas correspondientes a citocromos, sin embargo, no reportaron efectos adversos que motivaran la interrupción de la administración del aceite. De forma notable, este estudio determinó que el uso de CBD/THC permite reducir el uso de medicamentos para el dolor. De esta manera, el CBD también puede ayudar a personas que padecen de demencia, principalmente por medio del manejo de síntomas como dolor y cambios de comportamiento.

Desafíos para la implementación de medicamentos en base a CBD

Un factor que dificulta la implementación del CBD para su uso medicinal es la baja biodisponibilidad al administrarse por vía oral, ya que su absorción es de solo 6% [37]. Esta baja absorción genera un aumento en las dosis y por ende un incremento en el costo de producción. Se ha logrado mejorar su biodisponibilidad mediante la suplementación en conjunto con ciertos alimentos o por otras vías de administración, sin embargo, no han sido lo suficientemente efectivas [37], por lo que explorar factores que promueven esta capacidad resulta de gran importancia.

Por otra parte, se han reportado efectos adversos del uso del CBD en estudios clínicos. Algunos incluyen somnolencia, fatiga, pérdida del apetito y problemas gastrointestinales [38][39]. Además, en estudios con pacientes epilépticos se reportó hipertransaminasemia y sarpullido. Es posible que algunos de estos efectos se deban a interacciones del CBD con otros compuestos [39], por lo que es necesario investigar dichas interacciones para prevenir repercusiones negativas sobre los pacientes.

A su vez, las percepciones negativas sobre el CBD dificultan su implementación como tratamiento. Muchos profesionales de salud reconocen falta de conocimiento con respecto al tema, incluyendo médicos generales, neurólogos y otros que se dedican a la atención primaria [1-3]. Esto permite que sus creencias personales sobre el uso del cannabis influyan directamente sobre su práctica profesional [1], y también que sea menos probable que lo recomienden como tratamiento [1][3]. Asimismo, adultos mayores que buscan el cannabis como opción de tratamiento han reportado que su médico rechaza considerarlo como opción [5]; en adición, se ha visto que los adultos mayores que hacen uso del cannabis con fines medicinales suelen esconderlo, y describen el CBD como un tratamiento fácil de ocultar [4]. De este modo, es claro que existen condiciones de salud, farmacéuticas, y culturales que dificultan la implementación del CBD como un tratamiento para las enfermedades neurodegenerativas.

Conclusiones y perspectivas futuras

El CBD presenta múltiples efectos beneficiosos para el tratamiento de enfermedades neurodegenerativas, principalmente debido a su interacción con el sistema endocannabinoide y a su capacidad antioxidante. Al analizar su impacto sobre enfermedades específicas, se puede observar que actúa sobre rutas características de cada padecimiento, de forma que puede presentar beneficios adicionales dependiendo de la enfermedad. En el caso del Alzheimer, el CBD puede reducir la acumulación de compuestos que promueven su desarrollo y aceleran

su progreso. Para el Parkinson, el CBD puede limitar el daño neuronal y ayudar con el manejo de síntomas. Similarmente, en referencia al Trastorno Neurocognitivo Mayor, el CBD ayuda a mitigar los síntomas.

Aun así, falta mucha investigación sobre los mecanismos de acción específicos, dificultando la implementación efectiva de los tratamientos con este compuesto. Además, se requiere encontrar formas de mejorar la biodisponibilidad del CBD, lo que a su vez repercute en su eficiencia y costo, haciéndolo más accesible a la población. A esto se le suma la necesidad de estudios que busquen minimizar los efectos adversos; esto implicaría análisis de dosis, y su combinación segura con otros compuestos. Estas problemáticas representan líneas de investigación oportunas para facilitar el uso del CBD como tratamiento.

Debido al desconocimiento y al estigma, algunos proveedores de salud no recomiendan el CBD a pesar de los beneficios que podría presentar para sus pacientes, reflejando la necesidad de una mayor educación sobre estos compuestos que permita que su uso en el tratamiento de enfermedades neurodegenerativas. Igualmente, a nivel poblacional, el estigma también impacta la frecuencia con la que las personas acuden al CBD para tratar sus padecimientos, por lo que es necesario una mayor concienciación cultural sobre qué es el CBD, sus efectos, y las diferencias con respecto a otros compuestos que sí son psicoactivas y adictivas.

Referencias

[1] S. A. Syed *et al.*, "International perspectives on physician knowledge, attitudes, and practices related to medical cannabis," *Frontiers in Public Health*, vol. 13, p. 1463871, 2025, https://doi.org/10.3389/fpubh.2025.1463871.

[2] M. Savio, H. Kearney, y E. J. Downer, "Neurologists' perspectives of cannabis-based medicines: results from an all-Ireland survey," *Irish Journal of Medical Science*, vol. 194, no. 2, pp. 687-697, 2025, https://doi.org/10.1007/s11845-025-03880-0

[3] P. Sharma *et al.*, "Primary care provider attitudes, experiences and practices about cannabidiol (CBD) and barriers to patient-provider communication about CBD use: A qualitative study," *PEC Innovation*, vol. 1, p. 100044, Dic. 2022, https://doi.org/10.1016/j.pecinn.2022.100044

[4] S. Dahlke *et al.*, "The Effects of Stigma: Older Persons and Medicinal Cannabis," *Qualitative Health Research*, vol. 34, no. 8–9, pp. 717-731, Jul. 2024, https://doi.org/10.1177/10497323241227419

[5] S. Dahlke *et al.*, "Understanding Older Adults' Experiences with Cannabis for Medicinal Purposes: A Mixed Methods Study," *Canadian Journal on Aging / La Revue canadienne du vieillissement*, vol. 44, no. 1, pp. 10–19, Mar. 2025, https://doi.org/10.1017/S0714980824000357

[6] F. T. Avoseh, F. M. Mtunzi, O. N. Avoseh, y S. Takaidza, "Cannabis sativa; Ethnobotanicals, Classifications, Pharmacology, and Phytochemistry," *Natural Product Communications*, vol. 20, no. 6, Jun. 2025, https://doi.org/10.1177/1934578X251334244

[7] Y. Yang, R. Vyawahare, M. Lewis-Bakker, H. A. Clarke, A. H. C. Wong, y L. P. Kotra, "Bioactive Chemical Composition of Cannabis Extracts and Cannabinoid Receptors," *Molecules,* vol. 25, no. 15, p. 3466, Jul. 2020, https://doi.org/10.3390/molecules25153466

[8] K. M. Nelson *et al.*, "The Essential Medicinal Chemistry of Cannabidiol (CBD)," *Journal of Medicinal Chemistry*, vol. 63, no. 21, pp. 12137–12155, Nov. 2020, https://doi.org/10.1021/acs.jmedchem.0c00724

[9] A. K. Schlag, C. Hindocha, R. Zafar, D. J. Nutt, y H. V. Curran, "Cannabis based medicines and cannabis dependence: A critical review of issues and evidence," *Journal of psychopharmacology (Oxford, England)*, vol. 35, no. 7, pp. 773–785, Jul. 2021, https://doi.org/10.1177/0269881120986393

[10] T. Cassano *et al.*, "From Cannabis sativa to Cannabidiol: Promising Therapeutic Candidate for the Treatment of Neurodegenerative Diseases," *Frontiers in Pharmacology*, vol. 11, p. 515092, Mar. 2020, https://doi.org/10.3389/fphar.2020.00124

[11] N. Martinez Naya *et al.*, "An Overview of Cannabidiol as a Multifunctional Drug: Pharmacokinetics and Cellular Effects," *Molecules,* vol. 29, no. 2, p. 473, Ene. 2024, https://doi.org/10.3390/molecules29020473

[12] G. Madeo, A. Kapoor, R. Giorgetti, F. P. Busardò, y J. Carlier, "Update on Cannabidiol Clinical Toxicity and Adverse Effects: A Systematic Review," *Current neuropharmacology*, vol. 21, no. 11, pp. 2323–2342, Mar. 2023, https://doi.org/10.2174/1570159X21666230322143401

[13] D. M. Wilson, M. R. Cookson, L. van den Bosch, H. Zetterberg, D. M. Holtzman, y I. Dewachter, "Hallmarks of neurodegenerative diseases," *Cell*, vol. 186, no. 4, pp. 693–714, Feb. 2023, https://doi.org/10.1016/j.cell.2022.12.032

[14] R. Armstrong, "What causes neurodegenerative disease?," *Folia neuropathologica*, vol. 58, no. 2, pp. 93–112, Jun. 2020, https://doi.org/10.5114/fn.2020.96707

[15] Z. Breijyeh, R. Karaman, D. Muñoz-Torrero, y R. Dembinski, "Comprehensive Review on Alzheimer's Disease: Causes and Treatment," *Molecules,* vol. 25, no. 24, p. 5789, Dic. 2020, https://doi.org/10.3390/molecules25245789

[16] R. N. L. Lamptey, B. Chaulagain, R. Trivedi, A. Gothwal, B. Layek, y J. Singh, "A Review of the Common Neurodegenerative Disorders: Current Therapeutic Approaches and the Potential Role of Nanotherapeutics," *International Journal of Molecular Sciences,* vol. 23, no. 3, p. 1851, Feb. 2022, https://doi.org/10.3390/ijms23031851

[17] A. Duranti *et al.*, "The Endocannabinoid System as a Target for Neuroprotection/Neuroregeneration in Perinatal Hypoxic–Ischemic Brain Injury," *Biomedicines*, vol. 11, no. 1, p. 28, Ene. 2022, https://doi.org/10.3390/biomedicines11010028

[18] S. Schilling, R. Melzer, y P. F. McCabe, "Cannabis sativa," *Current Biology*, vol. 30, no. 1, pp. R8–R9, Ene. 2020, https://doi.org/10.1016/j.cub.2019.10.039

[19] N. Martinez Naya, J. Kelly, G. Corna, M. Golino, A. Abbate, y S. Toldo, "Molecular and Cellular Mechanisms of Action of Cannabidiol," *Molecules*, vol. 28, no. 16, p. 5980, Ago. 2023, https://doi.org/10.3390/molecules28165980

[20] E. D. Mock, B. Gagestein, y M. van der Stelt, "Anandamide and other N-acylethanolamines: A class of signaling lipids with therapeutic opportunities," *Progress in Lipid Research*, vol. 89, p. 101194, Ene. 2023, https://doi.org/10.1016/j.plipres.2022.101194

[21] A. Houldsworth, "Role of oxidative stress in neurodegenerative disorders: a review of reactive oxygen species and prevention by antioxidants," *Brain communications*, vol. 6, no. 1, 2024, https://doi.org/10.1093/braincomms/fcad356

[22] P. Wen *et al.*, "Oxidative stress and mitochondrial impairment: Key drivers in neurodegenerative disorders," *Ageing Research Reviews*, vol. 104, p. 102667, Feb. 2025, https://doi.org/10.1016/J.ARR.2025.102667.

[23] S. Bhunia, N. Kolishetti, A. Y. Arias, A. Vashist, y M. Nair, "Cannabidiol for neurodegenerative disorders: A comprehensive review," *Frontiers in Pharmacology*, vol. 13, p. 989717, Oct. 2022, https://doi.org/10.3389/FPHAR.2022.989717

[24] M. Ożarowski, T. M. Karpiński, A. Zielińska, E. B. Souto, y K. Wielgus, "Cannabidiol in Neurological and Neoplastic Diseases: Latest Developments on the Molecular Mechanism of Action," *International Journal of Molecular Sciences 2021,* vol. 22, no. 9, p. 4294, Abr. 2021, https://doi.org/10.3390/IJMS22094294.

[25] S. Khosropoor, M. S. Alavi, L. Etemad, y A. Roohbakhsh, "Cannabidiol goes nuclear: The role of PPARγ," *Phytomedicine*, vol. 114, p. 154771, Jun. 2023, https://doi.org/10.1016/J.PHYMED.2023.154771.

[26] A. Vasincu *et al.*, "Endocannabinoid Modulation in Neurodegenerative Diseases: In Pursuit of Certainty," *Biology,* vol. 11, no. 3, p. 440, Mar. 2022, https://doi.org/10.3390/BIOLOGY11030440.

[27] A. Pugazhendhi *et al.*, "Cannabinoids as anticancer and neuroprotective drugs: Structural insights and pharmacological interactions—A review," *Process Biochemistry*, vol. 111, pp. 9–31, Dic. 2021, https://doi.org/10.1016/J.PROCBIO.2021.08.025.

[28] C. Cattaneo y W. H. Jost, "Pain in Parkinson's Disease: Pathophysiology, Classification and Treatment," *Journal of integrative neuroscience*, vol. 22, no. 5, 2023, https://doi.org/10.31083/J.JIN2205132.

[29] K. Singh *et al.*, "Emerging Therapeutic Potential of Cannabidiol (CBD) in Neurological Disorders: A Comprehensive Review," *Behavioural Neurology*, vol. 2023, no. 1, p. 8825358, Ene. 2023, https://doi.org/10.1155/2023/8825358.

[30] S. Latif *et al.*, "Dopamine in Parkinson's disease," *Clinica Chimica Acta*, vol. 522, pp. 114–126, Nov. 2021, https://doi.org/10.1016/J.CCA.2021.08.009.

[31] K. R. Gandhi y A. Saadabadi, "Levodopa (L-Dopa)," *Encyclopedia of Psychopharmacology*, pp. 898–899, Abr. 2023, https://doi.org/10.1007/978-3-642-36172-2_200303.

[32] L. di Biase, P. M. Pecoraro, S. P. Carbone, M. L. Caminiti, y V. di Lazzaro, "Levodopa-Induced Dyskinesias in Parkinson's Disease: An Overview on Pathophysiology, Clinical Manifestations, Therapy Management Strategies and Future Directions," *Journal of Clinical Medicine,* vol. 12, no. 13, p. 4427, Jun. 2023, https://doi.org/10.3390/JCM12134427.

[33] S. Silvestro, G. Schepici, P. Bramanti, y E. Mazzon, "Molecular Targets of Cannabidiol in Experimental Models of Neurological Disease," *Molecules,* vol. 25, no. 21, p. 5186, Nov. 2020, https://doi.org/10.3390/MOLECULES25215186.

[34] P. D. Emmady, C. Schoo, and P. Tadi, *Major Neurocognitive Disorder (Dementia)*. Treasure Island: StatPearls Publishing, 2022. Accedido: Sept. 27, 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK557444/

[35] S. Pautex *et al.*, "Cannabinoids for behavioral symptoms in severe dementia: Safety and feasibility in a long-term pilot observational study in nineteen patients," *Frontiers in Aging Neuroscience*, vol. 14, p. 957665, Sept. 2022, https://doi.org/10.3389/fnagi.2022.957665

[36] F. Bianchi *et al.*, "Medical cannabinoids for painful symptoms in patients with severe dementia: a randomized, double-blind cross-over placebo-controlled trial protocol," *Frontiers in Pain Research*, vol. 4, p. 1108832, 2023, https://doi.org/10.3389/FPAIN.2023.1108832.

[37] M. Schouten, S. Dalle, D. Mantini, y K. Koppo, "Cannabidiol and brain function: current knowledge and future perspectives," *Frontiers in pharmacology*, vol. 14, 2024, https://doi.org/10.3389/FPHAR.2023.1328885.

[38] E. Chesney *et al.*, "Adverse effects of cannabidiol: a systematic review and meta-analysis of randomized clinical trials," *Neuropsychopharmacology: official publication of the American College of Neuropsychopharmacology*, vol. 45, no. 11, pp. 1799–1806, Oct. 2020, https://doi.org/10.1038/S41386-020-0667-2.

[39] J. D. R. Souza *et al.*, "Adverse Effects of Oral Cannabidiol: An Updated Systematic Review of Randomized Controlled Trials (2020–2022)," *Pharmaceutics*, vol. 14, no. 12, p. 2598, Dic. 2022, https://doi.org/10.3390/pharmaceutics14122598

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores aquí firmantes declaramos que no se utilizó ninguna herramienta de IA para la conceptualización, traducción o redacción de este artículo.

Assessment of heavy metal content in rivers and sediments: exploring relationships with land use and soil characteristics

Evaluación del contenido de metales pesados en ríos y sedimentos: exploración de las relaciones con el uso del suelo y las características del suelo

Guillermo Clavo-Brenes[1], Noemi Quirós-Bustos[2]

Fecha de recepción: 5 de diciembre, 2025
Fecha de aprobación: 18 de abril, 2026

Clavo-Brenes, G; Quirós-Bustos, N. Assessment of heavy metal content in rivers and sediments: exploring relationships with land use and soil characteristics. *Tecnología en Marcha*. Vol. 39 Nº 4. Octubre-Diciembre, 2026. Pág. 41-64.

https://doi.org/10.18845/tm.v39i4.8333

1 Environmental Protection Research Center, School of Chemistry, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.
calvogmo@yahoo.com
https://orcid.org/0000-0002-7021-3509
2 Center for Research and Chemical and Microbiological Services, School of Chemistry, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.
nquiros@itcr.ac.cr
https://orcid.org/0000-0002-2064-4300

Keywords

Heavy metal; land use, river, sediment.

Abstract

Heavy metal(s) (HM, HMs) are essential to biological and environmental processes, but excessive concentration threaten ecosystems and human health. This study assessed HM concentrations in river water and sediments, examining their relationships with land use and soil characteristics. A total of 26 sampling points were selected across Costa Rica, primarily based on land use: Arenal, Caño Negro, Tempisque, Pital, Toro, Tigre, Rincón, Sierpe, Torres, Poás, Segundo, Pacuare, Penshurt, and Birrís. The sampling period extended from September 2017 to July 2020. Most sampling sites showed detectable HM levels, with arsenic, nickel, and mercury sometimes exceeding thresholds for probable toxicity, most metals in sediments fell within an "undefined toxicity" range, though cadmium levels were notably high. Predictive models in sediments were more accurate: lead (70%), chromium (73%), arsenic (71%), and nickel (74%). The main predictors are: Urban land use (89%) for Lead; industrial activity (41.5%) and bare soil (17.7%) for Chromium; Cane (52%), Coffee (14%) and Cassava (13%) for Arsenic; and Bare Soil (78%) for Nickel. Models showed variable and complex patterns, but bivariate correlations were strong (80%, 90%, and 95%). Effective management strategies and continuous monitoring are critical to reducing contamination risks and protecting river ecosystems and water quality.

Palabras clave

Metales pesados; uso del suelo; río; sedimento.

Resumen

Los metales pesados (MP) son esenciales para los procesos biológicos y ambientales; sin embargo, su concentración excesiva amenaza los ecosistemas y la salud humana. Este estudio evaluó las concentraciones de MP en el agua y los sedimentos de los ríos, examinando su relación con el uso de la tierra y las características del suelo. Se seleccionaron un total de 26 puntos de muestreo a lo largo de Costa Rica, basados principalmente en el uso de la tierra: Arenal, Caño Negro, Tempisque, Pital, Toro, Tigre, Rincón, Sierpe, Torres, Poás, Segundo, Pacuare, Penshurt y Birrís. El periodo de muestreo se extendió desde septiembre de 2017 hasta julio de 2020. La mayoría de los sitios de muestreo mostraron niveles detectables de MP. El arsénico, el níquel y el mercurio superaron en ocasiones los umbrales de toxicidad probable. Aunque la mayoría de los metales en los sedimentos se ubicaron dentro de un rango de "toxicidad no definida", los niveles de cadmio fueron notablemente altos. Los modelos predictivos en sedimentos resultaron más precisos para el plomo (70%), cromo (73%), arsénico (71%) y níquel (74%). Los principales predictores identificados son: uso de suelo urbano (89%) para el Plomo; actividad industrial (41.5%) y suelo descubierto (17.7%) para el Cromo; Caña (52%), Café (14%) y Yuca (13%) para el Arsénico; suelo descubierto (78%) para el Níquel. Los modelos mostraron patrones variables y complejos, pero las correlaciones bivariadas fueron fuertes (80%, 90% y 95%). Las estrategias de gestión eficaces y el monitoreo continuo son fundamentales para reducir los riesgos de contaminación, así como para proteger los ecosistemas fluviales y la calidad del agua.

Introduction

Water is vital for numerous aspects of life, including drinking, sanitation, agriculture, industry, livestock, and ecosystems. Pollution arises both from direct wastewater discharges into rivers and from diffuse sources like agriculture runoff and air pollution [1], [2], [3], [4]. Pollutants bound to particulate matter in the air [5] eventually settle on the soil. Combined with existing soil contaminants, these pollutants are transported to rivers and coastal areas via erosion and surface runoff during rainfall events [6], [7].

HMs are significant pollutants with adverse effects on humans, animals, and plants health when their concentrations in water, air, soil, or sediments exceed permissible limits [8], [9]. Human exposure to HMs has been associated with various health issues, including developmental delays, cancer, kidney damage, and even fatalities [8]. While certain HMs occur naturally and some play essential roles in metabolic processes in flora and fauna [10] elevated concentrations render them hazardous pollutants [7]. HMs are introduced into the environment through both natural sources, such as rock weathering and mineral deposits, and anthropogenic activities, including agriculture, industrial processes, mining, power generation, and transportation [11], [12], [13].

Within living organisms, heavy metals can bioaccumulate, leading to long-term toxic effects when their concentrations exceed environmental or food safety thresholds [8]. As apex predators in the food chain, humans are particularly vulnerable to higher heavy metal concentrations due to biomagnification [12]. Elevated metal levels in plants can induce phytotoxic effects, such as reduced growth and disruptions in physiological processes [9].

Heavy metal pollution in the environment can occur through five main pathways: retention in soil, uptake by plants, deposition in airborne particulate matter, accumulation in urban dust, and changes in river physicochemical conditions that release metals from sediments. [9], [11].

Environmental factors such as rainfall, forest cover, soil characteristics, and land use significantly affect river water quality [14], [15], with pesticides and other agrochemicals being major contributors (Zhang et al., 2022). Therefore, monitoring water quality, assessing potential risks, and identifying HM sources in rivers and sediments are essential (Luo et al., 2021). Nonetheless, many existing studies face limitations in model accuracy, feature selection, and interpretability—challenges that become especially pronounced in high-dimensional, heterogeneous settings where traditional methods struggle to generalize [16].

The aim of the study was to investigate the relationships between various heavy metals and land cover/ use, including specific agricultural practices, as well as soil texture.

Materials and methods

Study area

Costa Rica, located in Central America, features a diverse landscape that includes mountain ranges, coastal plains, and tropical rainforests. The country's climate and weather patterns vary significantly by region, altitude, and season. In high-altitude areas, temperatures can drop to near 0°C, while coastal and northern regions may reach up to 40°C. Annual precipitation also varies widely, from over 3,000 mm in some regions to as little as 100 mm in others.

Land cover/use in Costa Rica consists of a mix of agricultural lands, forests, and urban areas. The country's varied microclimates support the cultivation of different crops, with agriculture playing a crucial role in the economy. Major exports include coffee, bananas, and pineapples.

Coastal regions experience a tropical climate with high temperatures and humidity, while inland areas tend to have a more temperate climate with cooler temperatures. Costa Rica also experiences distinct wet (May to November) and dry (December to April) seasons.

Sampling sites

A total of 26 sampling points were carefully selected across Costa Rica, primarily based on land cover/use (detailed further below), as this variable significantly influences the quality of surface water and sediments (Calvo-Brenes, 2015). The study sites encompassed basins, sub-basins, and micro-basins in diverse regions, including San Carlos, Guanacaste, the Atlantic, the Greater Metropolitan Area, and the Osa Peninsula, each characterized by distinct land cover/uses Table 1). These regions span Costa Rica's total area of 51,000 square kilometers, as illustrated in Figure 1. Sampling points were located along major rivers such as Arenal, Caño Negro, Tempisque, Pital, Toro, Tigre, Rincón, Sierpe, Torres, Poás, Segundo, Pacuare, Penshurt, and Birrís, strategically positioned within their respective basins to capture regional variations in water quality.

Over nearly three-year period, surface water and sediment samples were collected mostly every two-three months from these sites. The samples were subsequently analyzed for a range of HMs, including lead (Pb), copper (Cu), cadmium (Cd), arsenic (As), chromium (Cr), nickel (Ni), and mercury (Hg).



Figure 1. Locations of sampling sites across Costa Rica's basins, sub-basins, and micro-basins, covering regions such as San Carlos, Guanacaste, the Atlantic, the Greater Metropolitan Area, and the Osa Peninsula, with varied land uses.

Table 1. Land cover/use in relation to sampling sites.

Land cover/ use	Sampling sites in basin scales												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Forest	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Chaparral											Yes		
Grass	Yes	Yes		Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Housing	Yes	Yes		Yes	Yes	Yes		Yes	Yes				
Industry					Yes								
Temporary crops							Yes						
Rice	Yes									Yes	Yes		
Sugar cane	Yes			Yes									
Banana								Yes	Yes	Yes			
Coffee				Yes									
Ferns				Yes									
Palm									Yes		Yes		
Yucca			Yes										
Pineapple			Yes										Yes

Note: 1 = Tempisque, 2=Arenal, 3=Toro, 4 = Poas, 5 = Segundo, 6 = Torres, 7 = Birris, 8 = Pacuare, 9 = Penshure, 10 = Sierpe, 11 = Rincon, 12 = Tigre, 13 = Pital.

Land cover/use

Land cover/use was classified into the following categories: forest, chaparral, pasture, urban, industrial, agricultural, and bare soil. The agricultural category was further divided into specific crop types, including rice, sugar cane, banana, coffee, fern, palm, cassava, and pineapple, as well as temporary crops like onion, potato, and carrot. Table 1 relates the land cover/ use for each sampling site. Land use assessment utilized satellite imagery from Sentinel 2 and Landsat 8 through USGA databases. Scenes were selected based on criteria including acquisition date, cloud cover threshold (e.g. <10 %), and spatial resolution (10-30 m depending on sensor). Supervised classification was performed using Quantum GIS software, applying training samples to assign land use categories. All imagery was retrieved through the USGS EarthExplorer platform (https://earthexplorer.usgs.gov/)

Other environmental variables

Other factors were considered in the study: dry or rainy season, soil texture and infiltration rate for every sampling site (Table 2).

Table 2. Some variables measured at each sampling site.

Sampling site	Soil Texture (%)			Infiltration Rate (mm/hr)
	Sand	Limus	Clay	
Arenal	69.7	22.3	8	25.9
Birris	50	48	2	25.9
Guanacaste	20	20	60	0.5
Penshurt	62	23	15	25.9
Pacuare	70	25	5	25.9
Poas	70	25	5	25.9
Rincon	75	10	15	25.9
Segundo	50	35	15	13.2
Sierpe	67	13	20	25.9
Tigre	37	38	25	13.2
Toro	32	51	17	6.9
Torres	65	23	12	25.9
Pital	57	21	22	4.3

Soil texture was determined with the Bouyoucos hydrometer method and classified using the USDA textural triangle. Based on these classes, field infiltration rates were measured with a double-ring infiltrometer to assess the relationship between texture and infiltration capacity.

Water and sediment sampling

Water and sediment samples were collected from all sampling points mostly every two-three months over nearly three years, allowing for the evaluation of heavy metal content during both the rainy and dry seasons, from September 2017 to July 2020, according to the "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater" (APHA, AWWA and AEF, 2022). Samples were collected as follows, in 2017: September and November; in 2018: January, March, May, July, September and November; and then in October 2019; in 2020: February, May and August. A total of 26 water and 26 sediment samples were collected from 26 sampling sites every two to three months, without considering replicates.

Water samples were collected in duplicate and sediment samples in triplicate at each sampling location. All replicate samples were collected simultaneously and handled following standard protocols to preserve their physical and chemical properties until laboratory analysis. Sample preservation was carried out using HNO_3 to adjust the pH to below 2.

Heavy metal analysis in water:

The water samples were analyzed for the following metal contents: Pb, Cr, Cd, Hg, Cu, As, and Ni. Prior to analysis, samples were preserved and subjected to acid digestion following the guidelines of the "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater". Method 3111A [17]. Mercury was measured with the AAnalyst 800 using hydride generation and flame atomic absorption, ensuring accurate concentration readings and the rest of HMs, using graphite furnace atomic absorption spectrometry (GF-AAS) with a Perkin Elmer model AAnalyst 800.

Heavy metal analysis in sediments:

Sediment samples were dried at 45°C for 48 hours and coarse particles were removed by sieving to <2 mm, ensuring consistency in the analyzed material [18], [19]. Digestion followed the EPA method SW-846 3051A [18].

Hg content was performed using the hydride generation technique and the remaining metals were analyzed using graphite furnace atomic absorption spectrometry, according to Method 3111A in the "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater" [17].

Verification of Methodologies:

Method validation was carried out using certified reference materials. Performance parameters, including accuracy, precision, detection and quantification limits, working range, and linearity, were evaluated. Additionally, the acceptance criteria established in the reference standard were applied.

Statistical Analysis

Regression analysis was performed in SPSS (version 28) [20]. The basic form of the regression equation is:

$$Y = \beta_1 X_1 + \ldots + \beta_n X_n + \beta_o + \varepsilon \quad (1)$$

where:

Y = HM concentration (mg/L).

$X_{1\text{-}n}$ = type of environment parameter.

$\beta_{1\text{-}n}$ = coefficients of each of the environmental variables

β_o = intercept value

ε = error

For the analysis, data was organized in an Excel spreadsheet. Each column represents a different variable, including sampling site, season, heavy metal concentrations, land cover/use, soil texture, and infiltration rate. Each row corresponds to an individual observation.

Several statistical assumptions were assessed through various tests. Normality was evaluated via residual analysis using histograms and normal probability plots. Homogeneity of variances was tested with Levene's test ($p = 0.05$).

Pearson correlation analysis evaluated bivariate relationships between each metal and their respective independent variables. The correlation coefficient (r) measures the strength and direction of linear relationships between continuous variables [15]. Correlation significance levels were categorized into three ranges: $p < 0.05$ (confidence level ≥ 95%, red-coded), 0.05–0.10 (confidence level 90–<95%, green-coded), and 0.10–0.20 (confidence level 80–<90%, yellow-coded). Only correlations with confidence levels above 80% were deemed significant.

In the variable selection stage, we adopted a significance level of $p \leq 0.2$ as the screening criterion. Although this threshold is more liberal than the conventional $\alpha = 0.05$, Mickey and Greenland (1989) demonstrated that stricter cutoffs can lead to the exclusion of potentially important variables, particularly confounders, in multivariable models. By using a higher threshold, like 0.25, in the exploratory phase, we reduce the risk of prematurely discarding predictors that may become significant once other variables are accounted for. This approach

is consistent with recommendations in epidemiological and environmental modeling, where the primary goal of initial screening is to ensure that relevant factors are considered for subsequent model refinement [21].

Modelling was combined with variable reduction, which differs from Pearson's bivariate correlation by considering multiple variables simultaneously and providing partial correlations. The "Stepwise" method streamlined the model, with an input alpha of 0.10 and an output alpha of 0.15.

Additionally, the adjusted R-squared (R^2) coefficient was calculated to assess the model's goodness of fit, indicating the proportion of variance in the dependent variable explained by the independent variables. Its variability depends on factors such as sample size, linearity assumptions, and outliers (Montgomery et al., 2021). The Variance Inflation Factor (VIF) was used to detect collinearity, with values exceeding 10 suggesting potential issues (Montgomery et al., 2021).

Water quality guidelines

The water quality (WQ) of the rivers (Table 3) was assessed based on the maximum limits specified for Class I water, which is the classification used for drinking water supply in Costa Rica [22]. Color coding refers to sites with "Not probable toxicity" (green-coded), while those with "Probable toxicity" (red-coded).

Sediment quality guidelines (SQG)

Numerous international guidelines exist for evaluating heavy metals in sediments. In this study, we used the consensus-based sediment quality guidelines developed in the United States [23], which define Threshold Effect Concentrations (TEC) and Probable Effect Concentrations (PEC) for individual metals in freshwater sediments. According to this schema, sediments with metal concentrations below the TEC are unlikely to pose adverse effects; concentrations above the PEC suggest probable toxicity, and values in between require further assessment. We coded values below TEC as "Not Probable Toxicity" (green), values above PEC as "Probable Toxicity" (red), and the intermediate range as "Toxicity Undefined" (yellow) (see Table 3 and Figure 4).

Table 3. HMs limits for water and sediment quality classification.

HM	Water (Class I, mg/L)	Sediments	
		TEC (mg/Kg DW)	PEC (mg/Kg DW)
Pb	<0.03	35.8	128
Cr	<0.05	43.4	111
Cd	<0.005	0.99	4.98
Hg	<0.001	0.15	1.00
Cu	<0.5	31.6	149
As	<0.01	9.79	33.6
Ni	<0.05	22.7	48.6

Note: Hg limits were taken from the Australian regulations [24]
Values below the TEC are green-coded (Not probable toxicity), between TEC and PEC are yellow-coded (Undefine toxicity), and over PEC are red-coded (Probable toxicity).

Results and discussion

Seasonal Variability

Based on the data gathered in an Excel spreadsheet, most metal concentrations showed minimal variability across seasons, with Pb, Cr, Cu, As, and Cd generally remaining at or near zero during both the dry and wet periods. Pearson's bivariate correlation analysis in river samples indicated an 80–90% confidence level for the relationship between season and Ni content. In sediments, Cr and Cu were associated with season at a confidence level between 90% and <95%. However, when modeling heavy metal content against multiple variables, only Pb in sediments retained season as a significant predictor in the final equation (Figure 2).

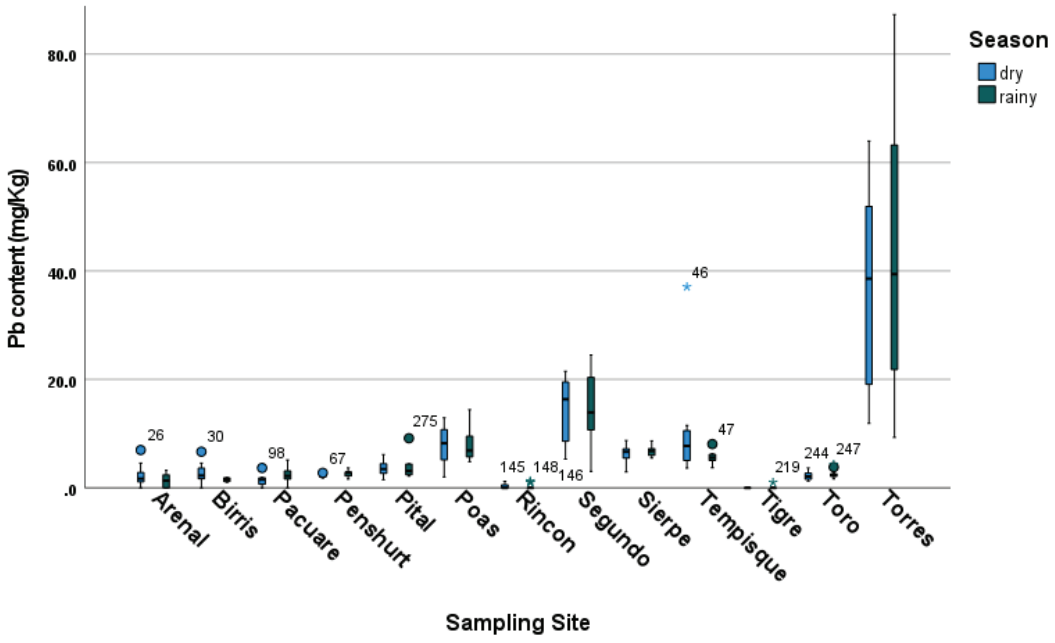
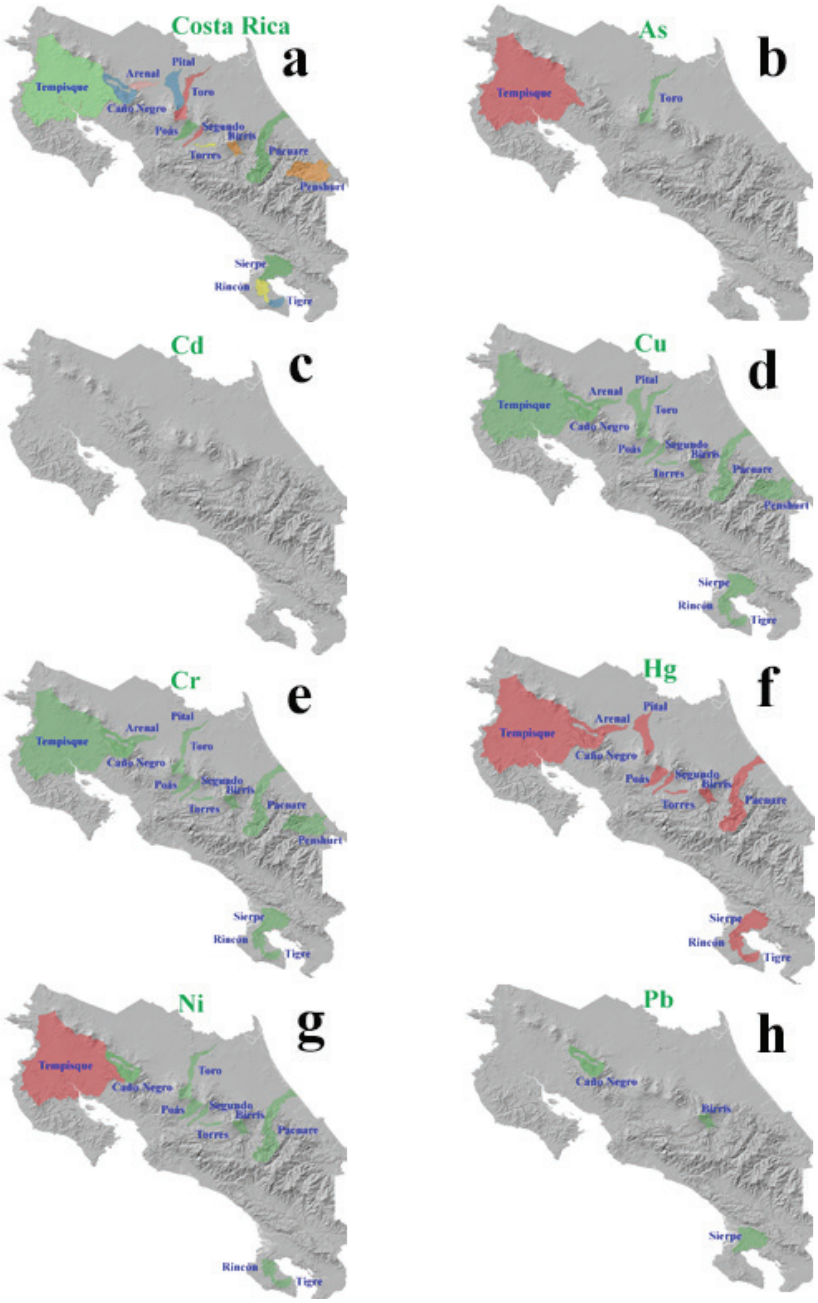


Figure 2. Variation of Pb content in relation to Season and sampling sites.

Although the statistical model indicated a significant correlation between Pb concentrations and season, the boxplots (Figure 2) reveal that this relationship is not consistent across sites showing minimal seasonal variation.

Heavy metals in rivers

Figure 3a shows the different sampling sites, with colors used solely to distinguish sites and not to indicate contamination levels. Figures 3b–3h illustrate toxicity levels of various heavy metals: As (3b), Cd (3c), Cu (3d), Cu and Ni (3e), Hg (3f), Ni (3g), and Pb (3h). These figures highlight the varying toxicity levels across sites, offering insight into the potential ecological impact of these contaminants in the rivers. A key finding from Figure 3 is that As and Ni at the Tempisque site were classified as 'Probable toxicity.' Hg showed 'Probable toxicity' at twelve sites, highlighting its widespread environmental concern. Other heavy metals remained at 'Not probable toxicity' levels across various sites.



Note:

Color	Classification
	Not Probable toxicity
	Probable toxicity

Figure 3. HMs toxicity levels in water for each sampling site.

While most rivers show low metal contamination, Tempisque and Birris have higher copper, mercury, and arsenic levels, suggesting localized pollution sources. Seasonal trends indicate higher lead and arsenic concentrations in the dry season, likely due to reduced dilution. Cadmium and chromium are not significant contaminants. Mercury levels exceeding permissible limits

pose serious health risks, including neurological and cardiovascular effects, and environmental threats through bioaccumulation. This can disrupt ecosystems, harm biodiversity, and impact local economies, underscoring the need for effective management and awareness efforts.

Pearson's Bivariate Correlation Analysis

The assessment of HMs included correlation analyses to identify relationships with environmental factors (Table 4).

Table 4. Pearson Bivariate Correlations were identified between HMs in river waters and land use activities.

Variable	Heavy metal content (mg/L)						
	Pb	Cr	Cu	As	Cd	Ni	Hg
Season	X	X	X	X	X	+	X
Forest	X	+	X	X	X	+	-
Chaparral	+	+	X	X	X	X	X
Grass	X	X	X	X	X	X	X
Housing	X	X	X	X	X	X	X
Industry	X	+	X	X	X	X	X
Temporary crops (onion, potato, carrot)	X	-	X	X	X	X	+
Rice	+	+	X	X	X	X	X
Sugar cane	X	+	+	+	X	+	X
Banana	X	X	X	X	X	-	X
Coffee	X	X	X	X	X	-	X
Ferns	X	X	X	X	X	-	X
Palm	+	-	X	X	X	X	X
Yucca	X	-	-	X	X	X	X
Pineapple	X	-	X	X	X	X	X
Bare soil	+	+	X	X	X	X	X
Sand	X	-	-	-	X	+	X
Lime	+	-	X	X	X	X	+
Clay	X	+	+	+	X	+	X
Infiltration Speed	X	-	X	X	X	-	X

Notes:

	Correlated (confidence level≥95%)
	Correlated (confidence level 90-<95%)
	Correlated (confidence level 80-<90%)

X = Not correlated
- = Negative correlation
+ = Positive correlation

Pearson's analysis showed significant correlations ($p < 0.05$) between Pb and land uses like Chaparral, Bare Soil, and Rice crops, while Cr correlated strongly with Forest, Chaparral, Industry, Sugarcane, Pineapple and Bare soil. Cu and As were linked to Sugarcane crops, and Cd showed no correlations. Ni ($p < 0.1$) correlated with Banana, Cane, and Forest, while Hg was associated with Temporary Crops. Correlations with other variables are shown in Table 4.

These correlations, whether positive or negative, suggest that certain plants may influence HM levels through hyper-bioaccumulation. Some species act as biofilters, reducing metal concentrations in soil or water [25], [26]. However, further research is needed to understand its long-term ecological effects [27]. These findings provide insights into the impact of land use on HM contamination and potential remediation strategies.

Although agricultural practices are likely contributors to the observed HM concentrations, the specific sources remain uncertain. Farmers were often reluctant to share detailed information about agrochemical use, limiting direct evidence. Thus, while the possibility of excessive or even prohibited agrochemical application cannot be ruled out, this study does not provide proof of such practices.

Predictive models in rivers, according to land use

Lead

The predictive model for Pb, incorporating land use and environmental variables, showed a significant correlation ($p < 0.05$) with a probability ≥95%. However, the adjusted R^2 was low (0.037), indicating limited explanatory power. Key variables influencing Pb levels included season, temporary crops, bare ground, ferns, and palm, suggesting that land use and seasonal changes impact Pb contamination (formula 1). Despite the low R^2, the strong p-value highlights the relevance of these factors. This model provides a foundation for refining predictions and exploring additional variables to better understand Pb dynamics in rivers.

$$[Pb] = 0.001185*Season+0.000173*Temporary\ Crops+ 0.007143*Bare\ soil+0.002576*Berns+0.000229*Palm\ +0.00005 \quad (1)$$

Despite its limited explanatory power, the model captures significant relationships between Pb levels and specific variables. The low R^2 suggests that additional factors influence Pb concentrations, highlighting the complexity of environmental interactions and the need for further research to improve model accuracy.

Chrome

Cr model showed a strong correlation ($p \leq 0.001$), indicating a robust relationship between chromium content and environmental variables. The adjusted R^2 values (0.356–0.376) suggest that 35.6% to 37.6% of Cr variability is explained by industry, sugarcane, banana, bare soil, and ferns (formula 2). While the model highlights key influencing factors, a significant portion of variability remains unexplained, suggesting other contributors.

$$[Cr] = 0.0305*Industry+ 0.00152*Cane+ 0.000345*Banana+ 0.006626*Bare\ soil- 0.006877*Ferns-5.130 \quad (2)$$

In conclusion, while the Cr model offers valuable insights into chromium concentrations and land use variables, its limitations must be acknowledged.

Copper

Cu model showed a strong correlation ($p \leq 0.001$), indicating a significant relationship between copper content and environmental variables. The adjusted R^2 values (0.156–0.191) suggest that 15.6% to 19.1% of copper variability is explained by sugarcane, ferns, cassava, and infiltration rate. Despite the strong correlation, the low R^2 values indicate that much of the variability remains unexplained.

$$[Cu] = 0.003089*Cane- 0.029293*Ferns- 0.001319*Cassava+ 0.000075*infiltration\ rate+0.012544 \quad (3)$$

Arsenic

As has a strong correlation ($p \leq 0.001$), indicating a significant relationship between arsenic content and environmental variables. The adjusted R^2 values (0.178–0.232) suggest that 17.8% to 23.2% of arsenic variability is explained by cane, ferns, and other factors. The highest R^2 value was observed in the model including cane and ferns (formula 4), highlighting the importance of these variables in influencing arsenic levels and underscoring the impact of agricultural practices on arsenic contamination.

$$[As] = 0.001368*Cane- 0.011485*Ferns+ 0.000045 \quad (4)$$

Cadmium

The absence of Cd at most sampling points prevents the creation of a predictive model for its relationship with land use and environmental variables.

Níckel

Ni showed a strong correlation ($p \leq 0.001$), indicating a significant relationship between the selected variables and nickel concentrations in rivers. The adjusted R^2 values (0.410–0.419) suggest that 41% to 42% of the variability in nickel levels can be explained by the model's variables. These include land use factors such as pasture, urbanization, industry, and crops, as well as environmental factors like infiltration rate (formula 5). Despite the model's strong correlation, the R^2 value suggests that additional factors may influence nickel levels, warranting cautious interpretation of the results.

$$[Ni] = -0.000190*Pasture-0.000233*Urbanism+ 0.013704*Industry- 0.000199*Temporary\ crops+ 0.001128*cane- 0.00056*Banana- 0.003953*Bare\ soil- 0.017404*Ferns- 0.00033*Palm- 0.000786*Cassava- 0.000051*Infiltration\ rate+0.015182 \quad (5)$$

Mercury

The predictive model for mercury (Hg) showed strong partial correlations ($p \leq 0.001$), indicating a significant relationship with selected variables. However, the low R^2 value of 0.090 suggests that only 9% of the variability in mercury levels can be explained by the model's variables. Key contributors were temporary crops and sugarcane (formula 6), likely influencing mercury distribution in river systems. Despite the strong bivariate correlations, the low R^2 indicates that other factors may also affect mercury levels.

$$[Hg] = 0.000427*Temporary\ crops+ 0.000186*cane+0.001403 \quad (6)$$

A summary table is as follows:

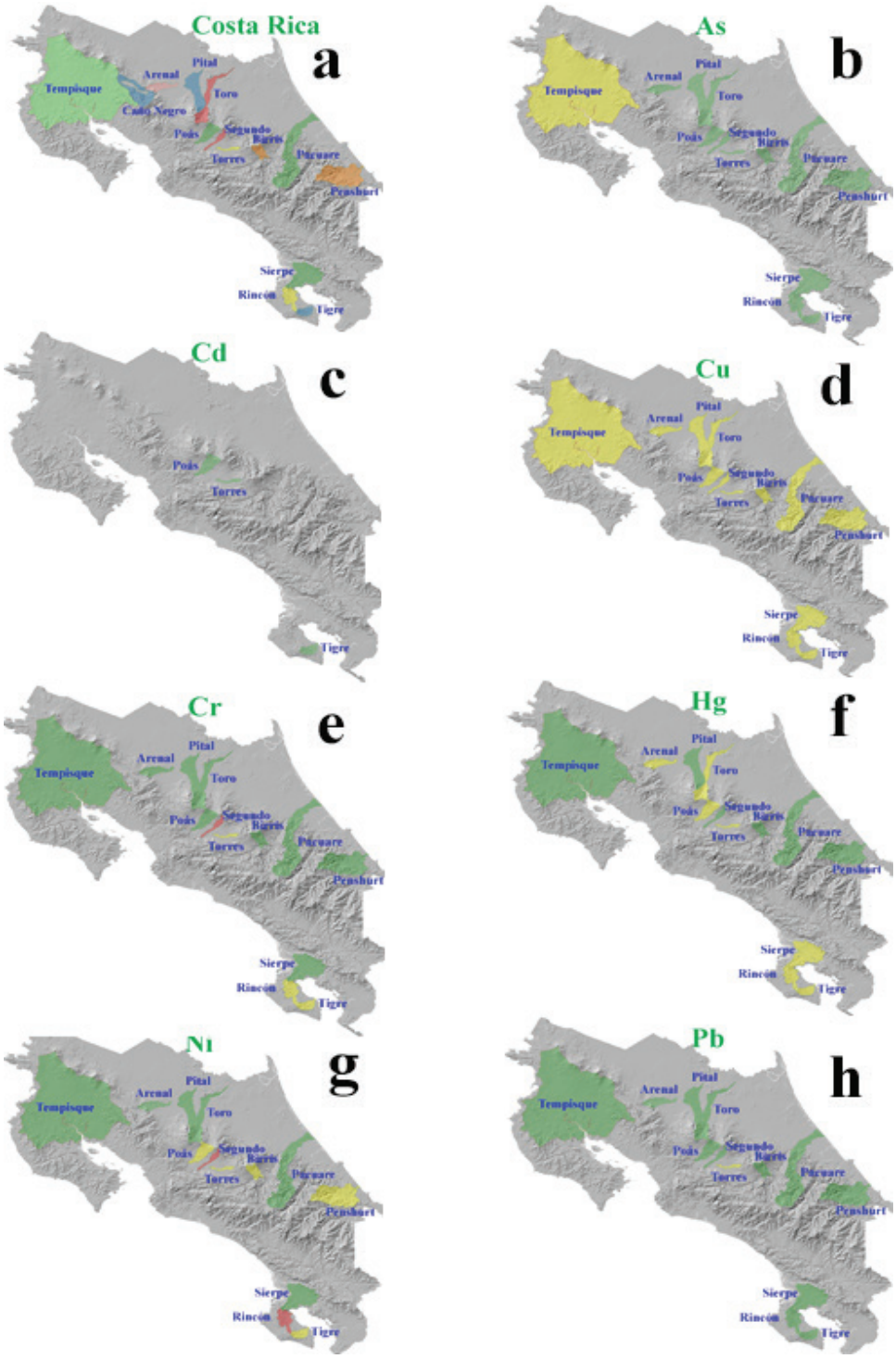
Table 5. Summary of predictive model performance for heavy metals (HMs) in river waters.

Metal	Key predictors	Adj. R^2	p-value	Notes / limitations
Pb	Season, temporary crops, bare soil, ferns, palm	0.037	<0.05	Statistically significant but weak explanatory power
Cr	Industry, sugarcane, banana, bare soil, ferns	0.356–0.376	≤0.001	Stronger model, ~36% variance explained
Cu	Sugarcane, ferns, cassava, infiltration rate	0.156–0.191	≤0.001	Moderate significance, low explanatory power
As	Sugarcane, ferns	0.178–0.232	≤0.001	Key role of agricultural practices
Cd	–	–	–	Too few data to model
Ni	Pasture, urbanism, industry, crops, infiltration rate	0.410–0.419	≤0.001	Strongest model, ~42% variance explained
Hg	Temporary crops, sugarcane	0.090	≤0.001	Low explanatory power despite significance

Predictive models for HMs varied considerably in their explanatory power (Table 5). Ni and Cr showed the strongest models, with adjusted R^2 values up to ~42% and ~37%, respectively, indicating that land use and environmental variables account for a substantial portion of their variability. In contrast, Pb and Hg models had very low adjusted R^2 values (<10%), suggesting that additional unmeasured factors play a key role in their distribution. Cu and As models were intermediate (Adj. R^2 ~16–23%), while Cd could not be modeled due to sparse occurrence. Across metals, agricultural variables (e.g., sugarcane, banana, cassava, palm, temporary crops) and land cover (bare soil, ferns, pasture) consistently appeared as significant predictors, underscoring the influence of both crop type and land disturbance on HM concentrations. Industrial and urban land uses were also recurrent drivers, particularly for Ni and Cr. Despite statistical significance ($p \leq 0.05$), the generally modest R^2 values highlight the complexity of HM dynamics and the need to incorporate additional explanatory variables such as geology, hydrology, and agrochemical inputs in future models.

HMs in sediments

Figure 4 presents the average toxicity levels of various metals across sampling zones, including basins and watersheds. Figure 4a shows the different sampling sites, with colors used solely to distinguish sites and not to indicate contamination levels, the remaining subfigures depict metal-specific toxicity distributions. Notably, Ni shows probable toxicity in Rincón and Segundo, and undefined levels at three other sites (Figure 4g). As appears with undefined toxicity only in Tempisque (Figure 4b). Cu shows the same level across 13 sites (Figure 4d), and Hg across six (Figure 4f), highlighting spatial patterns and potential contamination risks.



Note:

Color	Classification
	Not probable toxicity
	Undefined toxicity
	Probable toxicity

Figure 4. HMs toxicity levels in sediments for each sampling site.

The analysis of HM contamination across sites (Figure 4) reveals both positive and concerning trends, highlighting the need for continuous monitoring and management. While Cd and Hg were detected in low concentrations or isolated sites, Cu, Ni, Cr, Pb and As showed broader distribution.

Though many metals fall within the "not probable toxicity" range, the frequent detection of Cu, Ni, and Hg in "undefined" or "probable toxicity" categories is concerning due to their risks to aquatic life and human health via bioaccumulation.

Sites like Torres, Segundo, and Rincón showed elevated levels and should be prioritized for intervention. The findings support adaptive monitoring and watershed-based management to address pollution effectively. A multifaceted strategy involving science, community engagement, and regulation is essential for sustainable water resource protection.

Pearson's Bivariate Analysis in Sediments

Pearson's bivariate analysis (Table 6) showed significant positive correlations ($p < 0.05$) between Pb concentrations and land use types such as Forest, Chaparral, Urbanism, and Industry, as well as crops like Banana, Yucca, and Pineapple. Pb also correlated with bare soil, silt and clay textures, and infiltration rate.

These results suggest that urban, industrial, and certain agricultural activities contribute to elevated Pb levels, likely through runoff and soil erosion. Weaker correlations ($0.1 < p < 0.2$) were observed with Rice and Temporary crops, indicating a less pronounced influence.

Understanding these associations is key for developing targeted strategies to mitigate Pb contamination and safeguard environmental and public health.

Table 6. Pearson's Bivariate Correlations identified between HMs in river sediments and land use activities.

Variable	Heavy metal content (mg/L)						
	Pb	Cr	Cu	As	Cd	Ni	Hg
Season	X	+	+	X	X	X	X
Forest	+	+	X	-	X	+	-
Chaparral	-	+	X	-	X	+	-
Grass	X	X	-	-	X	-	X
Housing	+	+	+	+	+	X	+
Industry	+	+	+	-	X	+	X
Temporary crops (onion, potato, carrot)	-	X	-	-	X	X	X
Rice	+	-	+	+	-	+	+
Sugar cane	X	-	X	+	-	-	X
Banana	-	-	X	-	-	-	-
Coffee	X	-	X	+	X	X	+
Ferns	X	-	X	+	X	X	+
Palm	X	-	+	X	X	-	+
Yucca	-	-	-	+	X	-	-
Pineapple	-	-	-	+	-	-	-
Empty soil	-	+	X	-	X	+	-
Sand	X	-	-	-	-	-	-
Lime	-	+	-	-	+	+	+
Clay	+	+	+	+	X	X	X
Infiltration Speed	+	-			-	-	-

Notes:

	Correlated (confidence level≥95%)
	Correlated (confidence level 90-<95%)
	Correlated (confidence level 80-<90%)

X = Not correlated
- = Negative correlation
+ = Positive correlation

Pearson's analysis revealed significant positive correlations ($p<0.05$) between HM concentrations and various land cover/uses, crop types, and soil properties. Cu and As showed strong associations with land covers like Forest and Chaparral. Urbanism, and Industry, and with crops such as Sugarcane, Banana, and Palm. As also showed correlations with some temporary crops, Coffee and Ferns (Table 6). Cu correlates with Grass, Housing, Industry, Temporary Crops and Rice and Palm. Cd correlates with Housing, some relationship with Sugar Cane and Banana. Ni has strong correlations with Forest, Charral-Tacotal, Industry, Rice, Palm and Sugar Cane. Hg is related to Charral-Tacotal, Urbanism, Banana, Coffee, Ferns and Palm.

These results indicate that urban, industrial, and agricultural activities significantly influence HM concentrations in sediments. Crops like Sugarcane, Rice, and Pineapple are frequently associated with higher metal levels, likely due to intensive agrochemical use. Phosphate fertilizers and some pesticides are known to contain trace metals such as Cd, As, and Pb; although farmers in the study area did not disclose specific inputs, these agrochemicals may contribute to the observed patterns. Additionally, hyper-bioaccumulation processes may explain negative correlations, where certain vegetation absorbs metals from sediments.

The findings highlight the environmental risks posed by land use change, particularly through deforestation, soil disturbance, and runoff, all of which can mobilize stored metals. These dynamics threaten aquatic and terrestrial ecosystems through bioaccumulation, especially of metals like Hg, which pose toxic risks across the food web.

Given the variability of HM distribution across regions, local geological, climatic, and land use histories should be considered. Future monitoring programs should assess both water and sediment quality, incorporating community participation to enhance awareness and conservation efforts.

Sediment predictive models by land use

Higher adjusted R^2 values in sediment models indicate that land use and environmental factors better explain HM content in sediments than in rivers. Sediments act as long-term sinks, integrating historical inputs and cumulative land use effects, while river concentrations fluctuate with flow, dilution, and seasonal changes. Fine particles such as clay and silt enhance sediment capacity to retain metals through adsorption and related processes, making them more stable and reliable indicators of contamination. Thus, sediments provide clearer insights into long-term HM dynamics and are valuable for guiding pollution mitigation strategies.

Lead

The adjusted R^2 of 0.696 after variable reduction indicates a strong model fit. Including all correlated variables yielded a nearly identical R^2 (0.695), suggesting that just five key predictors—Urbanism, Industry, Palm, Pineapple, and Sugarcane—are sufficient to explain most of the variance in HM content in sediments.

This simplified model enhances practical applicability, aiding environmental managers by identifying priority land uses for intervention. Targeted strategies, such as promoting sustainable agriculture or regulating industrial discharges, can help reduce contamination risks.

$$[Pb] = 0.911*Urbanism - 35.922*Industry + 0.178*Palm + 0.097*Pineapple - 0.303*Cane - 0.084 \quad (7)$$

The calculated incremental contribution of each land-use variable using forward selection. Urban land use alone explained Adjusted $R^2 = 0.620$, while the full model reached Adjusted $R^2 = 0.691$. Thus, urbanism represents ~89.7% of the total explained variance, and the other variables collectively contributed ~10% (Adjusted R^2 for Industry = 0.038, for Palm = 0.018, for Pineapple = 0.012, for Sugarcane = 0.007). This indicates that while other land uses provide additional explanatory power, urban land use is the dominant predictor of heavy-metal concentrations in the study area.

Chrome

The predictive model for Cr in sediments, with an adjusted R^2 of 72.7%, demonstrates strong explanatory power. Key variables include Urbanism, Industry, Chaparral, Pasture, Bare Soil, Silt Texture, and crops like Rice, Cassava, Banana, and Temporary Crops.

These findings underscore the influence of urban, industrial, and agricultural activities on Cr accumulation. Targeted interventions, such as pollution control and erosion-reducing agricultural practices, could help mitigate contamination. The inclusion of soil-related variables highlights the importance of land management and soil conservation in maintaining sediment quality.

$$[Cr] = +0.466*Urbanism + 168.615*Industry - 59.364*Chaparral - 0.259*Pasture + 242.434*Bare\ soil + 0.938*Silt - 30.994*Rice - 2.275*Cassava - 1.173*Banana - 0.954*Temporary\ crops + 10.237 \quad (8)$$

For chromium (Cr), the regression model explained 72.7% of the variance in concentrations (Adjusted $R^2 = 0.727$). The largest contribution was from industrial land use (0.302, 41.5% of explained variance), followed by bare soil (0.129, 17.7%), urban land use (0.092, 12.7%), and limus (0.069, 9.5%). Other land uses such as Rice (0.046, 6.3%), Chaparral (0.030, 4.1%), Temporary Crops (0.031, 4.3%), Cassava (0.016, 2.2%), Pasture (0.012, 1.7%), and Banana (0.010, 1.4%) contributed smaller increments. This indicates that industrial activities and bare soil exposure are the dominant predictors of Cr distribution, while agricultural and secondary land covers make comparatively minor contributions.

Copper

Copper (Cu) exhibits significant bivariate correlations with various variables, but the predictive model's low adjusted R^2 (0.227 for the full model and 0.226 for the reduced one) suggests that these variables do not fully explain Cu concentrations in sediments. This indicates that other, unexamined factors may play a significant role in Cu accumulation.

The similarity in R^2 values between the models calls for further investigation to identify additional variables, such as land use practices or localized pollution sources, that may influence Cu levels.

Arsenic

The predictive model for As in sediments, with an adjusted R^2 of 0.713, indicates that the selected variables—Forest, Pasture, Industry, Sugar Cane, Coffee, Rice, Cassava, and Temporary Crops—effectively explain a significant portion of As concentration variability (formula 9). Human activities, especially in urban and industrial areas, play a crucial role in As accumulation, highlighting the need for targeted land use management.

The correlation between As and agricultural practices, particularly with crops like Rice and Cassava, suggests that sustainable farming practices could help reduce As levels in sediments. Soil composition and land management practices, such as soil conservation, are also vital in mitigating As accumulation.

$$[As] = -0.084*Forest – 0.054*Pasture - 3.354*Industry + 0.637*Cane - 0.189*Coffee + 0.298*Cassava + 0.674*Rice - 0.068*Temporary\ crops + 8.321 \quad (9)$$

For arsenic, the stepwise contributions of land cover types to the total adjusted R^2 of 0.705 show that Cane alone explains the largest portion, accounting for approximately 52% of the model's explanatory power. Coffee and Cassava follow, contributing around 14% and 13% respectively, while Forest and Pasture add roughly 8% and 9%. The remaining land uses—Temporary Crops, Industry, and Rice—have minimal influence, each explaining less than 2% of the total variance. Overall, this indicates that the majority of arsenic variability in the study area is strongly associated with Cane, Coffee, Cassava, Pasture, and Forest cover, with other land uses playing only a minor role.

Cadmium

Cd concentrations in sediments exhibit significant bivariate correlations with variables such as Urbanism, Rice, Sugarcane, Banana, and Pineapple crops, as well as soil textures like Sand and Silt and Infiltration Rate (Table 3). However, the predictive model, after variable reduction, reveals a low adjusted R^2 of 0.178, indicating that the selected variables do not explain a significant portion of the variability in Cd levels.

Nickel

The predictive model for sediment Ni content, with an adjusted R^2 of 0.741, indicates a strong ability to explain the variability in Ni concentrations. The model includes key predictor variables such as Urbanism, Industry, Chaparral, Rice, Pasture, Bare Soil, and Silt Texture, (formula 10) which collectively capture significant relationships influencing Ni levels in sediments.

The model highlights the impact of human activities, particularly urbanization and industrialization, on Ni accumulation. These findings emphasize the importance of effective land use planning and pollution management to reduce Ni contamination in aquatic ecosystems. Additionally, the inclusion of agricultural practices, particularly Rice and Sugarcane cultivation, suggests that farming can contribute to Ni accumulation, making sustainable agricultural practices vital for mitigating pollution.

The role of sediment composition, especially Silt Texture in Ni dynamics is also significant. Understanding how soil properties interact with metal accumulation can inform land management strategies aimed at reducing contamination.

$$[Ni] = +84.791*Industry + 0.170*Urbanism – 0.274*Pasture – 22.609*Chaparral + 137.479*Bare\ soil – 26.420*Rice – 2.184*Cassava – 0.540*Banana + 493*Silt + 17.081 \quad (10)$$

For nickel, the total adjusted R^2 of 0.741 is largely explained by Bare Soil, which alone accounts for approximately 78% of the model's explanatory power. Adding Industry increases the explanatory power to 0.637, followed by Limus (0.660), Rice (0.695), Cassava (0.713), and Pasture (0.731), each providing moderate incremental contributions. Urbanism, Banana, and Chaparral add only minor increments, bringing the final adjusted R^2 to 0.741. Overall, the results indicate that Bare Soil is the dominant factor driving nickel variability, while other land uses—particularly Agriculture and Pasture—contribute smaller but meaningful amounts, and urban and natural covers have minimal impact.

Mercury

The predictive models for sediment Hg content, both with and without variable reduction, show relatively low adjusted R^2 values of 0.351 and 0.352, respectively, indicating limited ability to explain variability in Hg concentrations. These low values suggest that the selected predictor variables do not adequately capture the complex factors influencing Hg accumulation in sediments.

The findings highlight the need for caution in using these models for Hg contamination predictions and emphasize the importance of exploring additional variables that may influence Hg levels.

The complexity of Hg accumulation in sediments suggests that interactions among a wider range of factors could be influencing its concentrations. To enhance understanding of Hg contamination, further research is needed, focusing on local pollution sources, sediment geochemistry, hydrological factors, and climate influences.

A summary of the models is as follows:

Table 7. Predictive model performance for heavy metals in sediments.

Metal	Adj. R^2	Key predictors	Main insights	Notes/limitations
Pb	0.696	Urbanism, Industry, Palm, Pineapple, Sugarcane	Urban land use dominates (≈90% of explained variance); other variables add ~10%	Strong model; requires validation elsewhere
Cr	0.727	Industry, Bare soil, Urbanism, Chaparral, Pasture, Rice, Cassava, Banana, Temporary crops, Silt	Industrial land use (42%) and bare soil (18%) are main drivers; urbanism secondary	High explanatory power; still needs mechanistic exploration
Cu	0.227	Sugarcane, Ferns, Cassava, Infiltration rate (weak effect)	Weak model; suggests other unmeasured factors control Cu	Needs more variables/ localized pollution sources
As	0.713	Cane, Coffee, Cassava, Pasture, Forest, Rice, Temporary crops, Industry	Cane explains ~52%, coffee 14%, cassava 13%; agricultural practices key	Strong model; underscores farming impacts
Cd	0.178	Urbanism, Rice, Sugarcane, Banana, Pineapple, Sand/Silt textures, Infiltration rate	Weak model; large portion of variability unexplained	Likely influenced by historical/point sources
Ni	0.741	Bare soil, Industry, Silt, Rice, Cassava, Pasture, Urbanism, Chaparral, Banana	Bare soil dominates (~78%); other uses add incrementally	Strongest model overall; sediment texture important
Hg	0.351	Temporary crops, Sugarcane (weak influence)	Limited explanatory power; suggests missing factors (e.g., atmospheric deposition)	Model underperforms; needs broader environmental scope

Predictive models for heavy metals in sediments showed variable performance (Table 7). Strong explanatory power was achieved for Ni (Adj. R^2 = 0.741), Cr (0.727), Pb (0.696), and As (0.713), indicating that land use and soil properties account for a substantial share of their variability. In particular, Bare Soil (Ni), Industrial land use (Cr), Urbanization (Pb), and Sugarcane (As) emerged as dominant predictors, often explaining more than half of the modeled variance. By contrast, models for Cu, Cd, and Hg had low explanatory power (Adj. R^2 < 0.35), suggesting that other unmeasured factors—such as local pollution sources, atmospheric deposition, or historical land use—likely govern their distribution. Across metals, three patterns are consistent: (i) urban and industrial activities are recurrent drivers of contamination; (ii) agricultural practices, especially Sugarcane, Rice, and Pineapple cultivation, are frequently linked to HM variability; and (iii) soil properties (e.g., Silt, Infiltration) play a significant but secondary role. These findings underscore that HM accumulation in sediments is shaped by an interplay of anthropogenic activities and environmental conditions. Collectively, the models highlight priority land uses for management (urban, industrial, and intensive agriculture), but also point to the need for additional explanatory variables to improve predictive accuracy. Integrating hydrogeological, climatic, and agrochemical data in future models will be essential for capturing the full complexity of HM dynamics in sediments.

In this study, several factors were identified that could further improve predictive models of heavy metal (HM) dynamics, including seasonal hydrological variations, soil and sediment physicochemical properties (e.g., organic matter content, particle size), and specific anthropogenic activities such as agricultural runoff and urban wastewater inputs. Understanding the underlying mechanisms of HM accumulation and transport—particularly the role of sediments as long-term sinks versus water as a snapshot of current contamination—provides a more comprehensive assessment of environmental risks. The correlation analyses and predictive models developed here reveal patterns not previously reported in the region, such as the stronger retention of metals in fine sediment particles and the significant influence of land use on sediment HM levels, highlighting the added value of integrating sediment and water data. These findings have immediate practical applications for local stakeholders: they can guide targeted land management practices, inform monitoring programs by identifying potential contamination hotspots, and support evidence-based policy development to mitigate HM pollution in both water and sediment environments.

Conclusions

This study provides a comprehensive assessment of HMs contamination in river water and sediments, revealing that metal concentrations are spatially heterogeneous and strongly influenced by land use. Sediments acted as long-term sinks for contaminants, while water reflected more immediate conditions, with certain metals—such as Pb, Cr, Cu, As, Ni, and Hg—exceeding permissible limits in specific locations.

Significant correlations between HM concentrations and urban, agricultural, and industrial activities underscore the role of land use in shaping contamination patterns. Certain plant species demonstrated hyper-bioaccumulation potential, suggesting a possible mitigation pathway, though further research is needed to clarify mechanisms and long-term effects.

While some predictive models effectively captured metal dynamics, others, particularly for Hg, revealed limitations, highlighting the need to incorporate additional factors for improved accuracy. This emphasizes the importance of understanding both water and sediment dynamics to accurately predict contamination risks.

Overall, the study contributes new insights into the combined analysis of water and sediment, informs targeted monitoring and management strategies, and provides evidence to support policy development for protecting aquatic ecosystems and public health.

Recommendations

Integrated Land Management: To mitigate heavy metal pollution, it is crucial to implement sustainable land management practices. This includes promoting agricultural practices that reduce runoff and soil erosion, as well as controlling industrial discharges.

Monitoring Programs: Establishing comprehensive monitoring programs that assess both water and sediment quality can provide valuable insights into the extent of contamination and its impacts on ecosystem health.

Policy Development: Policymakers should consider the correlations identified in this study when formulating regulations and guidelines for land use and agricultural practices. Stricter regulations on industrial activities and urban development can help protect water quality and ecosystem integrity.

In conclusion, this research highlights the need for a multidisciplinary approach to understanding and managing heavy metal contamination in aquatic systems. Continued research is essential to explore the underlying mechanisms driving the observed correlations and to develop effective strategies for mitigating heavy metal pollution, ultimately contributing to the preservation of environmental health and community well-being.

Acknowledgments

The authors express their gratitude to the Instituto Tecnológico de Costa Rica for providing financial and administrative support throughout the duration of the project. They also extend their appreciation to the Centro de Investigación en Protección Ambiental (CIPA) and the Centro de Investigación y Servicios Químicos y Microbiológicos (CEQIATEC) for their valuable assistance and support in conducting the research. Their contributions were instrumental in the successful execution of the project.

Compliance with ethical standards No samples collected were required to compliance with the ethical standards of the Technological Institute of Costa Rica.

Consent to participate: Not applicable

Consent for publication: All author's consented for publication

Conflict of interest: The authors declare that they have no conflict of interest.

Availability of data and material: Upon request contacting Dr. Guillermo Calvo-Brenes, email calvogmo@yahoo.com

Code availability Not applicable

References

[1] G. Calvo-Brenes, *Indices e indicadores sobre la calidad del agua*, First. Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica, 2018.

[2] N. Gil-Rodas, G. Calvo-Brenes, A. Guerra, and A. Perdomo, "Water quality assessment of six rivers of the Pacific side of Guatemala," *Environ Earth Sci*, vol. 80, no. 5, p. 196, Mar. 2021, doi: 10.1007/s12665-021-09505-w.

[3] N. Gil-Rodas *et al.*, "A comparative study of several types of indices for river quality assessment," *Water Quality Research Journal*, vol. 58, no. 3, pp. 169–183, Aug. 2023, doi: 10.2166/wqrj.2023.029.

[4] R. Khan, A. Saxena, S. Shukla, S. Sekar, V. Senapathi, and J. Wu, "Environmental contamination by heavy metals and associated human health risk assessment: a case study of surface water in Gomti River Basin, India," *Environ Sci Pollut Res*, vol. 28, no. 40, pp. 56105–56116, Oct. 2021, doi: 10.1007/s11356-021-14592-0.

[5] T. Salazar-Rojas, F. R. Cejudo-Ruiz, and G. Calvo-Brenes, "Assessing magnetic properties of biomonitors and road dust as a screening method for air pollution monitoring," *Chemosphere*, vol. 310, p. 136795, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.136795.

[6] G. Calvo-Brenes, *Ríos: Fundamentos sobre su calidad y su relación con el entorno socioambiental*, First. Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica, 2015.

[7] J. Lebepe, M. C. Selala, Y. Takai, N. M. Maleka, and S. B. S. Hlatshwayo, "Accumulation of Heavy Metals in Tissues of Oreochromis Mossambicus from the uMgeni River and Human Health Risk Assessment," *Water Air Soil Pollut*, vol. 235, no. 11, p. 726, Nov. 2024, doi: 10.1007/s11270-024-07553-z.

[8] Y. Hong *et al.*, "Progress in the Research of the Toxicity Effect Mechanisms of Heavy Metals on Freshwater Organisms and Their Water Quality Criteria in China," *Journal of Chemistry*, vol. 2020, pp. 1–12, May 2020, doi: 10.1155/2020/9010348.

[9] X. Zeng, J. Du, S. Zhang, and T. Ni, "Spatial-Temporal Characteristics of Ecological Risks from Heavy Metals for Aquatic Fauna in Drinking Water Sources of China," *Water Air Soil Pollut*, vol. 234, no. 12, p. 733, Dec. 2023, doi: 10.1007/s11270-023-06734-6.

[10] T. Salazar-Rojas, F. R. Cejudo-Ruiz, and G. Calvo-Brenes, "Comparison between machine linear regression (MLR) and support vector machine (SVM) as model generators for heavy metal assessment captured in biomonitors and road dust," *Environmental Pollution*, vol. 314, p. 120227, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.envpol.2022.120227.

[11] H. Ali, E. Khan, and I. Ilahi, "Environmental Chemistry and Ecotoxicology of Hazardous Heavy Metals: Environmental Persistence, Toxicity, and Bioaccumulation," *Journal of Chemistry*, vol. 2019, pp. 1–14, Mar. 2019, doi: 10.1155/2019/6730305.

[12] J. Briffa, E. Sinagra, and R. Blundell, "Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on humans," *Heliyon*, vol. 6, no. 9, p. e04691, Sept. 2020, doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e04691.

[13] U. C. Nkwunonwo, P. O. Odika, and N. I. Onyia, "A Review of the Health Implications of Heavy Metals in Food Chain in Nigeria," *The Scientific World Journal*, vol. 2020, pp. 1–11, Apr. 2020, doi: 10.1155/2020/6594109.

[14] P. Luo *et al.*, "Heavy metals in water and surface sediments of the Fenghe River Basin, China: Assessment and Source Analysis," *Water Science and Technology*, vol. 84, no. 10–11, pp. 3072–3090, 2021, doi: 10.2166/wst.2021.335.

[15] L. Zhang, X. Tan, H. Chen, Y. Liu, and Z. Cui, "Effects of Agriculture and Animal Husbandry on Heavy Metal Contamination in the Aquatic Environment and Human Health in Huangshui River Basin," *Water*, vol. 14, no. 4, p. 549, Feb. 2022, doi: 10.3390/w14040549.

[16] Y. Xu *et al.*, "Integrating machine learning for enhanced spatial prediction and risk assessment of soil heavy metal(loid)s," *Environmental Pollution*, vol. 383, 2025, [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.126919

[17] APHA, AWWA and AEF, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 23rd ed. WA, DC, USA, 2017.

[18] N. P. Castro-González, F. Calderón-Sánchez, R. Moreno-Rojas, J. V. Tamariz-Flores, and E. Reyes-Cervantes, "Heavy metals pollution level in wastewater and soils in the alto balsas sub-basin in tlaxcala and puebla, Mexico," *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, vol. 35, no. 2, pp. 335–348, 2019, doi: 10.20937/RICA.2019.35.02.06.

[19] C. Montalvo *et al.*, "Metal Contents in Sediments (Cd, Cu, Mg, Fe, Mn) as Indicators of Pollution of Palizada River, Mexico," *EP*, vol. 3, no. 4, p. p89, Sept. 2014, doi: 10.5539/ep.v3n4p89.

[20] D. C. Montgomery, E. A. Peck, and G. G. Vining, *Introduction to linear regression analysis*, Sixth edition. in Wiley series in probability and statistics. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2021.

[21] R. M. Mickey and S. Greenland, "A study of the impact of confounder-selection criteria on effect estimation," *American Journal of epidemiology*, vol. 129, no. 1, pp. 125–137, 1989, doi: https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aje.a115101.

[22] MINAE, "Reglamento para la evaluación y clasificación de la calidad de cuerpos de agua superficiales," vol. Decreto # 33903-MINAE-S, 2007.

[23] D. D. MacDonald, C. G. Ingersoll, and T. A. Berger, "Development and Evaluation of Consensus-Based Sediment Quality Guidelines for Freshwater Ecosystems," *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, vol. 39, no. 1, pp. 20–31, June 2000, doi: 10.1007/s002440010075.

[24] DEC, "Assessment levels for soil, sediment and water." 2010. [Online]. Available: https://www.der.wa.gov.au/images/documents/your-environment/contaminated-sites/guidelines/2009641_-_assessment_levels_for_soil_sediment_and_water_-_web.pdf

[25] H. Juarez, "Contaminación del río Rimac por metales pesados y efecto en la agricultura en el Cono Este de Lima Metropolitana." 2012. [Online]. Available: file:///C:/Users/XPC/Downloads/Contaminacion_del_Rio_Rimac_por_metales.pdf

[26] M. M. Uddin, M. C. M. Zakeel, J. S. Zavahir, F. M. M. T. Marikar, and I. Jahan, "Heavy Metal Accumulation in Rice and Aquatic Plants Used as Human Food: A General Review," *Toxics*, vol. 9, no. 12, p. 360, Dec. 2021, doi: 10.3390/toxics9120360.

[27] E. M. Eid *et al.*, "Prediction Models Founded on Soil Characteristics for the Estimated Uptake of Nine Metals by Okra Plant, Abelmoschus esculentus (L.) Moench., Cultivated in Agricultural Soils Modified with Varying Sewage Sludge Concentrations," *Sustainability*, vol. 13, no. 22, p. 12356, Nov. 2021, doi: 10.3390/su132212356.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores declaraamos haber utilizado *ChatGPT* para múltiples tareas: la revisión gramatical y de estilo y el apoyo en la estructura y redacción. Todos los resultados e información asistidos por IA fueron revisados, verificados y validados minuciosamente por los autores, quienes asumen plena responsabilidad por la precisión, coherencia e integridad del contenido publicado.

Thermal processing and acidification: an undergraduate laboratory exercise

Procesamiento térmico y acidificación: un ejercicio de laboratorio de grado

José Adrián Chaves-Quesada[1], Óscar Acosta-Montoya[2]

Fecha de recepción: 20 de enero, 2026
Fecha de aprobación: 3 de mayo, 2026

Chaves-Quesada, J.A; Acosta-Montoya, O. Thermal processing and acidification: an undergraduate laboratory exercise. *Tecnología en Marcha*. Vol. 39 Nº 4. Octubre-Diciembre, 2026. Pág. 65-76.

https://doi.org/10.18845/tm.v39i4.8426

1 Centro Nacional de Ciencia y Tecnología de Alimentos, Universidad de Costa Rica. Costa Rica.
jose.chavesquesada@ucr.ac.cr
https://orcid.org/0000-0001-7592-0643

2 Centro Nacional de Ciencia y Tecnología de Alimentos, Universidad de Costa Rica. Costa Rica.
oscar.acosta@ucr.ac.cr
https: //orcid.org/0000-0001-8156-6556

Keywords

Academic laboratory; thermal processing; acidification; non-linear regression; modeling.

Abstract

Food engineering programs should provide students with practical activities related to the analysis of unit operations, within the context of food processing. Both effectiveness and efficiency should be evaluated, so students can recognize the importance of achieving an objective and quantifying resources employed to achieve the goal. We describe an undergraduate-level food engineering laboratory exercise divided in two sections. Both use carrot cylinders in vinegar solutions, packed in glass jars with metal lids, thermally processed in boiling water. In the first section (thermal processing) students collect time and temperature data during a heat penetration study. The experimental variable is the process time, and the response variable is the accumulated lethality (Tref = 93.3ºC, z = 8.9ºC). In the second section (acidification), students collect time and pH data during an acidification study. The experimental variables are the acetic acid concentration and the acidification time, and the response variable is the carrot cylinders' pH. In both sections, students perform basic statistical analyses, carrying out calculations related to non-linear regression, prediction intervals, inverse prediction, and model verification. This laboratory exercise can assist in illustrating concepts, techniques, measurements, calculations, model development, and statistical analyses related to thermal processing and acidification of food.

Palabras clave

Laboratorio universitario; proceso térmico; acidificación; regresión no-lineal; modelado.

Resumen

Los programas de ingeniería de alimentos deberían brindar a los estudiantes actividades prácticas relacionadas con el análisis de las operaciones unitarias, dentro de un contexto de procesamiento de alimentos. Se debe evaluar la eficacia y eficiencia de manera que los estudiantes puedan reconocer la importancia de lograr un objetivo y cuantificar los recursos empleados para lograr el objetivo. Describimos un ejercicio de laboratorio en ingeniería de alimentos a un nivel de grado dividido en dos secciones. Ambas utilizan cilindros de zanahorias en una solución de vinagre, envasados en frascos de vidrio con tapas metálicas, procesados térmicamente en agua en ebullición. En la primera sección (procesamiento térmico) los estudiantes toman los datos de tiempo y temperatura durante un estudio de penetración de calor. La variable experimental es el tiempo de proceso, y la variable respuesta es la letalidad acumulada (Tref = 93.3ºC, z = 8.9ºC). En la segunda sección (acidificación), los estudiantes toman los datos de tiempo y pH durante un estudio de acidificación. Las variables experimentales son la concentración de ácido acético y el tiempo de acidificación, y la variable respuesta es el pH de los cilindros de zanahoria. En ambas secciones, los estudiantes realizan análisis estadísticos básicos, determinando cálculos relacionados a regresiones no lineales, intervalos de predicción, predicción inversa, y verificación de modelos. Este ejercicio de laboratorio puede ayudar a ilustrar conceptos, técnicas, mediciones, cálculos, desarrollo de modelos y análisis estadísticos relacionados con procesamiento térmico y acidificación de alimentos.

Introduction

Legislation states that acid foods are foods that have a natural pH of 4.6 or below, and acidified foods are low-acid foods that have been treated with acid(s) or acid food(s) so as to attain a finished equilibrium pH of 4.6 or below [1],[2]. Some acidified products can be manufactured without heat treatments and are microbiologically stable indefinitely at ambient temperatures in unopened containers. The exceptional resistance to microbiological spoilage of these products is attributable to pH values usually below 4.0, typically high concentrations of acetic acid, and limited headspace and oxygen availability [3]. Nonetheless, most acid and acidified products require a thermal process in order to achieve commercial sterility. The severity of this heat treatment, however, is significantly less than necessary for processing low acid foods, because the product's pH will prevent the germination and growth of bacterial spores, and the thermal resistance of microorganisms will be reduced at lower pH [4]. Suggested F-values (Tref = 93.3ºC, z = 8.9ºC), which are dependent on the product's equilibrium pH (for foods with pH of less than 4.6), can be found in the literature [5]. These F-values can be used to design and evaluate a thermal process.

The manufacturing process of acidified foods must therefore include at least two critical control points: acidification and thermal process. The acidification step must be carried out to ensure that the product's established finished equilibrium pH is reached throughout the food in a timely manner. On the other hand, the thermal process must be properly delivered, so that the established lethality is achieved in the product's cold spot. All critical factors related to both unit operations must be accordingly identified, controlled, and properly recorded.

Several procedures for acidification are described in the literature and regulations, which can be used by food processors. Selection of specific techniques depends on the effects of process variables on pH reduction and sensory properties of foods. Variables that affect the acidification procedures can be categorized as dependent (such as tissue structure and pH variability) or independent from raw materials (such as concentration of acid solution, treatment time, and dimension and shape of food pieces) [6]. The processor must control acidification of foods, which should be monitored by measurements on both in-process samples and finished product [7]. Excessively lowering pH values (which could affect sensory and functional attributes of the foods) and long acidification times should be avoided.

The thermal process of acidified food aims to inactivate molds, yeasts, vegetative cells of bacteria, inactivate enzymes, and cook the product where necessary [4]. However, the thermal process must be properly designed and executed, so that excessive degradation of sensory attributes (such as texture and color) and nutritional and functional components is avoided. At the same time, the thermal process should be optimized in order to increase efficiency, in terms of reduction of energy consumption and process time.

The use of models in science can serve 3 goals: understanding (as a tool in applying the scientific method, which contributes to understanding changes occurring in the studied food), prediction (to quantify the future state of a food, based upon prior knowledge of the food and the applied process), and control (process conditions and food properties are set in order to achieve a desired outcome) [8]. Acidification and thermal processing are unit operations which can be used to illustrate the utility of models with regards to their goals. Therefore, we propose a 4 hour undergraduate-level laboratory exercise which aims to help illustrate concepts, techniques, measurements, calculations, model development, and statistical analyses related to thermal processing and acidification of food.

Methodology

Materials

Carrots were locally purchased and stored at 5ºC until used (less than 1 week). They were washed, peeled, and cut in 2 cm diameter and 8 cm length cylinders. 458 mL glass jars (height and diameter: 10 and 8 cm) provided with plastisol-lined metal lug caps (DISTINCOMER, Cartago, Costa Rica) were used. Vinegar solutions of varying concentrations (as dictated by the experimental setup) were prepared from a commercial white vinegar with 3% acidity expressed as acetic acid (MFS, ELIMAR Y NAZLEA, Alajuela, Costa Rica). Carrot cylinders in vinegar solutions, packed in glass jars, were thermally processed in a boiling water bath, using a Groen DN/TA-10 SP steam kettle (Dover Corporation, Groen Division, Elk Grove Village, IL, USA). Six 62 mm, needle type T thermocouples (Ecklund-Harrison Technologies Inc., Fort Myers, FL, USA), a CALPlex datalogger, and CALSoft 5 software (TechniCAL, Inc., New Orleans, LA, USA) were used for time and temperature measurements. The datalogger used in this study was calibrated by TechniCAL Inc. following internal standards. Thermocouples were assessed for correction needs using an ice-water bath (approximately 0°C) and boiling water (approximately 96°C) against calibrated thermometers to verify the accuracy of the temperature measurements and ensure proper instrument performance pH measurements were performed using an OAKTON pH 700 benchtop meter with temperature compensation, provided with an OAKTON 35811-71 electrode (Eutech Instruments Pte. Ltd., Ayer Rajah Crescent, Singapore). pH meter was calibrated using the manufacturer's procedure.

Experimental setup: thermal processing

Heat penetration studies were conducted. Each experimental run consisted of 5 glass jars. 9 carrot cylinders were weighed (225 ± 1 g) and placed in each jar. A 50% vinegar and 50% water solution (1.5% acetic acid) at 80ºC was added to each jar (160 ± 1 g), which were promptly capped. Beforehand, a needle thermocouple (connected to the datalogger) was fixed to each of the 5 jar's metal caps. The thermocouple was inserted through the center of the carrot cylinder located at the middle of the jar. The length of the thermocouple allowed the temperature to be measured at the geometric center of the middle carrot cylinder. This position was determined by preliminary trials to be the product's cold spot, which for heat penetration studies is the slowest heating food particle in the slowest heating location within the container [9]. All 5 jars were placed at the same time in boiling water in a steam kettle. The kettle's size and steam supply were enough that the water temperature apparently did not change (water was boiling before, during, and after immersion of jars). Each of the 5 jars was taken out of the boiling water at process times 6, 11, 16, 21, and 26 min, respectively. Process time 0 corresponds to the time when jars were immersed. Jars were left to passively cool at ambient temperature (25 ± 2 ºC) until they reached 60ºC. Temperature of each jar was recorded every 10 s. Recording started before jars were placed in boiling water and ended when jar temperature reached 60ºC. Process times were selected based on preliminary trials, so that their resulting accumulated lethalities ranged between approximately 1 and 20 min (Tref = 93.3ºC, z = 8.9ºC). Each experimental run was carried out 4 times (each corresponding to a replicate). Two model verification experiments were carried out. Each experiment consisted of independently processing 3 jars (replicates) at process times 16 or 24 min (both process times were randomly selected). Experimental conditions of verification experiments were equivalent to those previously described.

Experimental setup: acidification

Acidification studies were conducted. The same experimental setup described for the thermal processing section was followed, with the following changes: (1) each experimental run consisted of 6 glass jars; (2) experimental runs were carried out using 3 acetic acid concentrations: 0.75, 1.5 or 3%, which were prepared by mixing vinegar and water at varying proportions; (3) temperatures were not measured (thermocouples were not inserted in carrot cylinders); (4) all jars were taken out of the boiling water at process time 15 min. Immediately after thermal processing, one jar was opened, carrot cylinders were drained, weighed, and homogenized to a uniform paste with a maximum of 20 mL of distilled water per 100 g of product [1]. pH of the paste was determined at 25 ± 2 °C. The same procedure for assessing the product's pH was repeated on the remaining jars, but 30, 60, 90, 150, and 210 min after thermal processing. Each experimental run at each acetic acid concentration was carried out 3 times (each corresponding to a replicate). Three model verification experiments were carried out, one for each acetic acid concentration. Each experiment consisted of independently processing 3 jars (replicates) at process time 15 min and assessing the product's pH at 70 min 20 s, 55 min 50 s, and 48 min 30 s after thermal processing (times were randomly selected), for acetic acid concentrations 0.75, 1.5 and 3%, respectively. Experimental conditions of verification experiments were equivalent to those previously described.

Data analysis: thermal processing

From recorded time and temperature data, accumulated lethality (F) was calculated for each of the 5 evaluated process times based on equation 1, where t corresponds to time, T to temperature, T_{ref} to a reference temperature of 93.3ºC, and z to a thermal resistance of 8.9ºC [5]. Only temperatures equal to or above 60ºC were used to calculate accumulated lethality [10].

$$F = \int_0^t 10^{\left(\frac{T-T_{ref}}{z}\right)} dt \qquad \text{Equation 1}$$

A 3-parameter exponential model (equation 2) was used to fit accumulated lethality (F) as a function of process time (t_p). Parameter a corresponds to the asymptote, b to the scale, and c to the growth rate.

$$F = a + be^{(c*t_p)} \qquad \text{Equation 2}$$

This model was selected using the Akaike Information Criterion corrected for small sample sizes (AICc). Among the candidate models evaluated, the model with the lowest AICc value was considered the best-supported model, as AICc balances goodness-of-fit against model complexity while accounting for small sample sizes. [11]. The model enables the calculation of accumulated lethality for any given process time and also allows determination of the required process time to achieve a specific accumulated lethality through inverse prediction (Equation 3).

$$t_p = \frac{\ln\left(\frac{F-a}{b}\right)}{c} \qquad \text{Equation 3}$$

Lower and upper prediction intervals (PI) were calculated for each process time evaluated. Once the point estimates were obtained, the same 3-parameter model previously used for the experimental data (Equation 2) was fitted in order to obtain equations for lower and upper prediction intervals within the evaluated time range.

For model verification experiments, accumulated lethality values were determined for each of the three jars at process times of 16 and 24 minutes to obtain the observed (experimental) data. The predicted values were calculated using Equation 2, substituting t_p with 16 or 24 minutes.

Data analysis: acidification

The previously described 3-parameter exponential model (Equation 2) was also used to fit the product's pH as a function of acidification time for each of the three acetic acid concentrations tested. This model allows not only the estimation of pH at any given acidification time but also the calculation of the acidification time required to reach a target pH value through inverse prediction. Additionally, lower and upper prediction intervals (PI) were calculated individually for the data obtained at each process time evaluated, and the same 3-parameter model (equation 2) was subsequently fitted in order to obtain lower and upper prediction intervals within the evaluated time range.

For model verification, pH values were measured for each of the three jars at acidification times of 70 min 20 s, 55 min 50 s, and 48 min 30 s, corresponding to acetic acid concentrations of 0.75%, 1.5%, and 3%, respectively. These measurements provided the experimental (observed) data, while predicted values were obtained from Equation 2 using the respective acidification times.

Statistical analyses and model fitting

Statistical analyses and model fitting were conducted using statistical software JMP 11 (SAS Institute, Cary, NC). Statistical tests were performed at 0.05 significance level.

Results and Discussion

Thermal processing

The data collected during the experiments enable undergraduate students to analyze the behavior of the product throughout the entire thermal process. Figure 1 illustrates heat penetration, variation of lethal rate, and lethality accumulation over the processing time. In Figure 1A, it can be observed that after the jars are removed from the boiling water (points 1 through 5 marked with arrows), the product temperature continues to increase for several minutes in most cases, leading to a continued increase in the accumulated lethality (Figure 1C), even after effectively ending the thermal process and during the cooling stage. This observation allows students to appreciate the significant influence of the passive cooling stage (conducted at ambient temperature) on the accumulated lethality and, consequently, on process effectiveness. In most cases, the cooling phase is not considered in lethality calculations and is instead treated as a security factor by the Process Authority. However, if cooling is not accelerated, issues such as the degradation of nutritional compounds or change of texture may occur [12].

Figure 1C shows that Jar 1, subjected to the shortest processing time, reached a total accumulated lethality value of less than 1 minute. Considering the product's pH, this lethality value may be insufficient to achieve commercial sterility, indicating that the applied thermal treatment was inadequate, given that for a pH of 4,1-4,2, a lethality of 2,5 min (Tref = 93.3ºC, z = 8.9ºC) is required [5]. Moreover, it can be observed that at the geometric center of the middle carrot cylinder, the maximum temperature attained was below 80 °C and this temperature was achieved only after the jar was removed from the boiling water. These results help students understand the underlying heat transfer mechanisms, particularly conduction within a solid food

matrix such as carrots [13]. The trends observed in Figure 1(A, B, C) were expected for every jar at different process time, where a long process time achieved higher values of temperature, lethal rate, and accumulated lethality [4].

It is important to remark that the pH of the product plays a critical role due to its direct effect on microbial inactivation. Low pH values decrease the thermal resistance of microorganisms because changes in intracellular pH can damage enzymes, proteins, and microbial DNA, leading to irreversible disruption of the cell membrane and thus reducing heat resistance [14]. In addition, spore-forming microorganisms such as Clostridium botulinum cannot germinate at pH values below 4.6, thereby limiting the possibility of producing the lethal toxin [15]. Therefore, thermal treatments must be designed according to the product's pH to ensure food safety and stability.

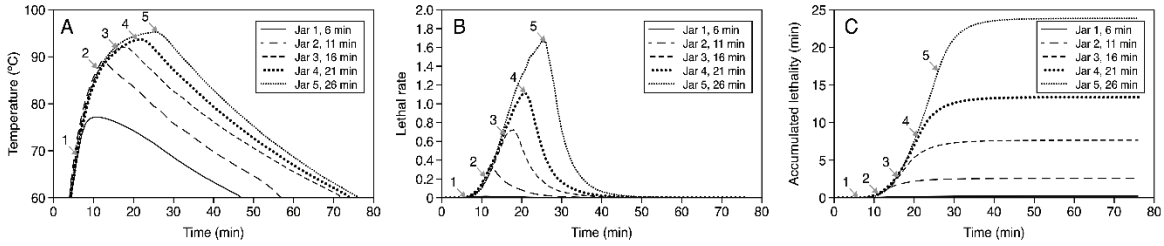


Figure 1. Temperature, lethal rate, and accumulated lethality as a function of process time.

The accumulated lethality as a function of total process time was modeled using the 3-parameter exponential model (Equation 2), as shown in Figure 2. Verification experiments are also included in this figure. Predicted values fall within the prediction intervals and importantly remain above the lower prediction interval.

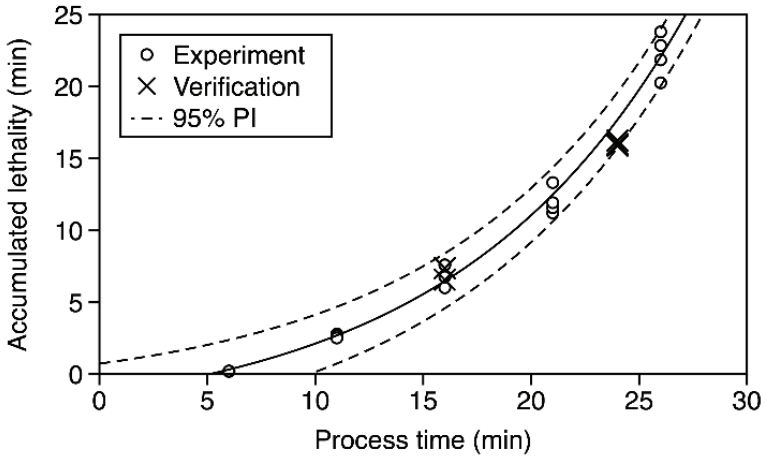


Figure 2. Accumulated lethality and values estimated from the validation experiments as a function of process time.

As expected, Figure 2 reveals that the accumulated lethality follows an exponential trend, indicating that small variations in process time can significantly impact the accumulated lethality.

Using the 3-parameter exponential model, students can predict the process time required to achieve a specific lethality value. For example, if a process must reach a lethality value of 6 minutes, students can use both the fitted model and the lower prediction interval (PI) equations (Table 1) to estimate the corresponding process time. In this case, the fitted model predicts a process time of 15.47 minutes, whereas the lower PI equation predicts 16.75 minutes.

Employing the lower prediction interval for inverse prediction acts as a security factor, since the accumulated lethality derived from this interval is lower than that obtained from the fitted model. Consequently, the process time estimated from the lower prediction interval is conservative, leading to an intentional overestimation of the thermal process. This approach also helps students understand and apply concepts such as nonlinear regression and inverse prediction in a practical, undergraduate laboratory context.

It is important to note that these equations must be developed for each specific food and thermal process, as the rate of heat penetration depends on the intrinsic characteristics of the food matrix and conditions of the process. Therefore, the corresponding equation can be established following the experimental procedure previously described.

Table 1. Fitted model and low predicted interval equations.

Model	Equation
Fitted model	$t = \frac{\ln((F + 3.67)/2.29)}{0.0931}$
Low PI	$t = \frac{\ln((F + 6.15)/3.00)}{0.0835}$

The values obtained during the model verification step showed error percentages of –9.9% and 9.3% for the 16 and 24 minutes processes, respectively, relative to the values predicted by the fitted model. The differences observed between the experimental lethality values and those predicted by the exponential model may be attributed to multiple factors that influence heat transfer in foods. These factors include the initial temperature of the product, the mass of both the product and the jar, the specific heat and thermal conductivity of the product, the geometry of the jar, the geometry of the carrot pieces, and the influence of natural convection during heating [16]. Although efforts were made to keep these variables constant, the geometry of the carrot pieces was the most difficult to control due to the manual handling required to shape each piece. This, in turn, directly affected the correct positioning of the thermocouple during each trial. Proper thermocouple placement within the carrot piece is essential for obtaining accurate heat penetration data, regardless of the processing temperature. Consequently, small variations in thermocouple position can significantly influence the magnitude of accumulated lethality for a given process.

Acidification

The second part of the experiment demonstrated the effects of acid concentration and process time [4]. These effects are illustrated in Figure 3, where, as expected, higher concentrations of acetic acid resulted in lower pH values. This behavior can be attributed to mass transfer phenomena, in which a greater number of acid molecules are available to diffuse from the acidulant into the carrot tissue. Other factors that could influence the acidification process such as temperature, mass ratio, and carrot cylinder dimensions [17], were carefully controlled to isolate the effect of acid concentration. Furthermore, the pH profiles presented in Figure 3 confirm the exponential trend over the acidification period, with the pH reaching a constant value after prolonged exposure of the solid food to the acidulant solution. This graphically illustrates the concept of equilibrium pH, which plays a critical role in food safety processes.

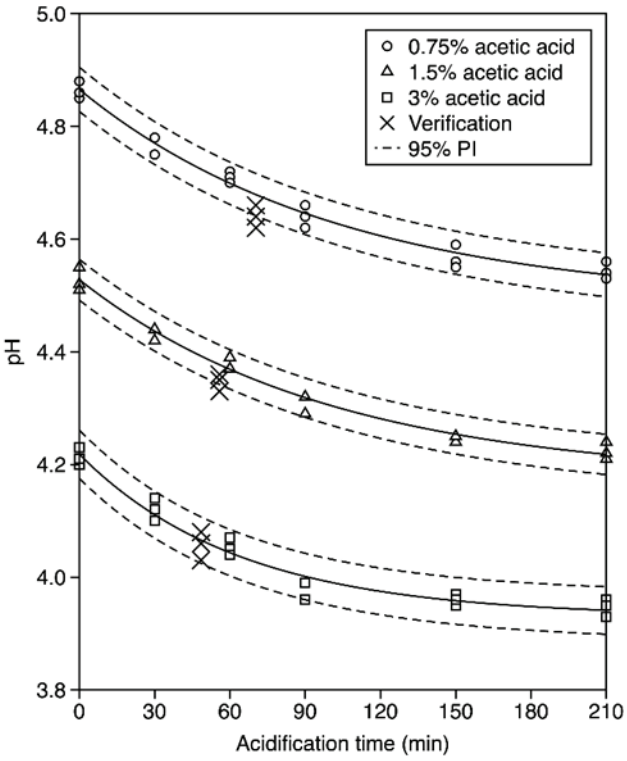


Figure 3. pH and values estimated from the validation experiments as a function of process time.

Following the same approach as described above, students can use the equations presented in Table 2 to predict different acidification times. For example, if the target pH is 4.3 at an acetic acid concentration of 1.5%, the fitted model predicts a process time of 41.9 minutes, while the high prediction interval yields 52.9 minutes. This outcome is desirable because a predicted value higher than that obtained from the fitted model provides an additional safety factor for processors. Although the difference of more than 10 minutes between both predictions could affect process efficiency, it is recommended to adopt the value from the upper prediction interval. This conservative approach ensures that the desired pH value is reached, preventing potential risks to product stability, if the food does not achieve the pH level for which the thermal process was designed. All corresponding equations for different acetic acid concentrations are presented in Table 2 .

Table 2. Fitted model and high predicted interval equations.

Model	Acid acetic (%)	Equation
Fitted model	0.75	$t = \frac{\ln(pH - 4.49)\ /0.38}{-0.0097}$
High PI		$t = \frac{\ln(pH - 4.54)\ /0.36}{-0.0011}$
Fitted model	1,5	$t = \frac{\ln(pH - 4.17)\ /0.35}{-0.01}$
High PI		$t = \frac{\ln(pH - 4.22)\ /0.34}{-0.012}$
Fitted model	3,0	$t = \frac{\ln(pH - 3.93)\ /0.29}{-0.016}$
High PI		$t = \frac{\ln(pH - 3.97)\ /0.29}{-0.018}$

The experimental values obtained in the model verification experiments showed an error percentage of 0.86, 0.46 and 0.24% for the concentrations of 0.75%, 1.5 % and 3% respectively, relative to the values predicted by the fitted model. The differences observed between the experimental data and the time values given by the fitted model are very similar. This result represents a great functionality of the model and a good experimental control of factors that can influence the acidification rate, such as the size of the pieces of carrots, the temperature of the acid solution, the moisture content of the food matrix and the stirring inside the jar [17].

The factors related to the food matrix and processing conditions are highly relevant, as they can significantly affect the acidification rate. For example, using a raw material with a high protein or lipid content may result in slower acidification rates, since proteins act as buffering agents and lipids can interfere with mass transfer because organic acids are generally distributed in an aqueous phase [18]. Nevertheless, other factors, such as food piece size, temperature, and even the level of agitation, may have an even greater influence on mass transfer phenomena. In the study conducted by Zeng et al. [19], acidified eggs treated with 2% acetic acid reached pH values below 4.0 after 1 hour at both 5 °C and 25 °C. These values are lower than those obtained in the present experiment after 1 hour, even though a higher acetic acid concentration (3%) was used with carrots as the food matrix. Similarly, in the experiment reported by Acosta et al. [17], pH measurements after 24 hours varied across different sections of the same food matrix (pickled eggs). These differences highlight that even small variations in the food matrix or experimental conditions can strongly affect the acidification rate and the resulting product pH. Therefore, specific experiments must be conducted for each product and process in order to ensure product stability.

By integrating both experiments and considering a hypothetical case in which a commercially sterile product with a target pH of 4.1 is desired using a 3% acetic acid concentration, students can apply the high prediction interval (PI) equation for 3% acetic acid (Table 2) to estimate the acidification time, obtaining a value of 44.57 minutes. Subsequently, they can use the lower

PI equation (Table 1) to calculate the process time required to achieve a lethality value of 2.5 minutes, which corresponds to 12.68 minutes [5]. In this way, students can design both the acidification and thermal processes to meet specific targets for the food matrix.

Conclusions

The integrated thermal processing and acidification experiments presented in this study provide undergraduate students with a comprehensive understanding of the fundamental principles governing heat transfer, microbial inactivation, and mass transfer in acidified foods. The thermal processing results highlight the relevance of passive cooling, the influence of heat penetration in solid foods, and the need to account for product pH when designing safe and effective thermal treatments. The application of a three-parameter exponential model, supported by prediction intervals, demonstrates how small variations in processing time and thermocouple positioning can significantly affect accumulated lethality, reinforcing the importance of precision in experimental procedures.

Similarly, the acidification experiments illustrate the impact of acid concentration on pH reduction kinetics, the exponential nature of pH decline, and the role of intrinsic and extrinsic factors in determining acidification rates. The fitted models and corresponding prediction intervals provide a practical framework for estimating process times required to reach target pH values, demonstrating how modeling tools can support decision making in food safety processes.

Finally, the integration of both experimental components enables students to design complete preservation strategies by combining acidification and thermal treatments for a specific food matrix. This approach not only strengthens their understanding of key concepts such as nonlinear regression, inverse prediction, accumulated lethality, and equilibrium pH, but also underscores the necessity of tailoring process parameters to the characteristics of each product. Overall, the laboratory experience provides an effective pedagogical tool for linking theoretical food science principles with practical applications in food safety and process design.

Acknowledgements

The authors acknowledge the funding provided by University of Costa Rica [B6069]. Authors received technical assistance from R. Alvarado.

References

[1] Food and Drug Administration, “21 CFR Part 114—Acidified foods,” U.S. Government Publishing Office, 2020. [Online]. Available: https://www.govinfo.gov/content/pkg/CFR-2020-title21-vol2/pdf/CFR-2020-title21-vol2-part114.pdf. [Accessed: Oct. 21, 2025].

[2] Codex Alimentarius Commission, “Code of hygienic practice for low and acidified low-acid canned foods (CAC/RCP 23-1979),” FAO/WHO, 1979. [Online]. Available: https://www.fao.org/input/download/standards/24/CXP_023e.pdf. [Accessed: Oct. 21, 2025].

[3] U.S. Food and Drug Administration, “Draft guidance for industry—Chapter 16: Acidified foods,” 2023. [Online]. Available: https://www.fda.gov/media/172317/download. [Accessed: Oct. 21, 2025].

[4] T. Deák and C. Mohácsi-Farkas, “Thermal treatment,” in *Food Safety Management: A Practical Guide for the Food Industry*, 2nd ed., V. Andersen, H. Lelieveld, and Y. Motarjemi, Eds. London, UK: Academic Press/Elsevier, 2023, pp. 405–419, doi: 10.1016/B978-0-12-820013-1.00008-5.

[5] I. J. Pflug, *Microbiology and Engineering of Sterilization Processes*. Rochester, MN, USA: Environmental Sterilization Laboratory, 2010.

[6] Y. B. Tola and H. S. Ramaswamy, “Novel processing methods: Updates on acidified vegetables thermal processing,” *Current Opinion in Food Science*, vol. 23, pp. 64–69, 2018, doi: 10.1016/j.cofs.2018.06.003.

[7] Y. H. Hui and W. K. Nip, *Handbook of Vegetable Preservation and Processing*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2004.

[8] F. Erdogdu, "Mathematical modeling of food thermal processing: Current and future challenges," *Current Opinion in Food Science*, vol. 51, p. 101042, 2023, doi: 10.1016/j.cofs.2023.101042.

[9] Institute for Thermal Processing Specialists, "Guidelines for conducting thermal processing studies," Guelph, ON, Canada, Mar. 13, 2014. [Online]. Available: https://iftps.org/page-18066.

[10] O. G. Acosta, F. M. Vermeylen, C. Noel, and O. I. Padilla-Zakour, "Modeling the effects of process conditions on the accumulated lethality values of thermally processed pickled carrots," *Food Control*, vol. 51, pp. 390–396, 2015, doi: 10.1016/j.foodcont.2014.12.005.

[11] J. J. Dziak, D. L. Coffman, S. T. Lanza, R. Li, and L. S. Jermiin, "Sensitivity and specificity of information criteria," *Briefings in Bioinformatics*, vol. 21, no. 2, pp. 553–565, Mar. 2020, doi: 10.1093/bib/bbz016.

[12] H. Singh and H. S. Ramaswamy, "Thermal processing of acidified vegetables: Effect on process time–temperature, color and texture," *Processes*, vol. 11, no. 4, p. 1272, 2023, doi: 10.3390/pr11041272.

[13] M. Farid, "Heat and mass transfer in food processing," in *Handbook of Farm, Dairy and Food Machinery Engineering*, 2nd ed. Academic Press, 2019, pp. 439–460, doi: 10.1016/B978-0-12-814803-7.00017-8.

[14] P. A. Lund *et al.*, "Understanding how microorganisms respond to acid pH is central to their control and successful exploitation," *Frontiers in Microbiology*, vol. 11, p. 556140, 2020, doi: 10.3389/fmicb.2020.556140.

[15] M. T. Munir *et al.*, "Physical treatments to control *Clostridium botulinum* hazards in food," *Foods*, vol. 12, no. 8, p. 1580, 2023, doi: 10.3390/foods12081580.

[16] R. Owusu-Apenten and E. Vieira, "Thermal processing and canning," in *Elementary Food Science*. Cham, Switzerland: Springer, 2022, pp. 253–288, doi: 10.1007/978-3-030-65433-7_12.

[17] O. Acosta, X. Gao, E. K. Sullivan, and O. I. Padilla-Zakour, "Pickled egg production: Effect of brine acetic acid concentration and packing conditions on acidification rate," *Journal of Food Protection*, vol. 77, no. 5, pp. 788–795, 2014, doi: 10.4315/0362-028X.JFP-13-362.

[18] R. E. Price *et al.*, "Modeling buffer capacity and pH in acid and acidified foods," *Journal of Food Science*, vol. 85, no. 4, pp. 918–925, 2020, doi: 10.1111/1750-3841.15091.

[19] H. Zeng *et al.*, "Inactivation kinetics of *Listeria monocytogenes* on hard-cooked eggs treated with organic acids," *Foods*, vol. 14, no. 17, p. 2985, 2025, doi: 10.3390/foods14172985.

Declaration on the Use of Artificial Intelligence (AI)

The authors declare that they used ChatGPT-4o for grammatical and stylistic editing. All AI-assisted results and information were thoroughly reviewed, verified, and validated by the authors, who assume full responsibility for the accuracy, coherence, and integrity of the published content.

Aplicaciones de microorganismos en la biorremediación de suelos mineros contaminados con metales pesados

Microorganism application as a tool for bioremediation of mining soil contaminated with heavy metals

Gabriel Solís-Ramírez[1], María Jesús Ruiz-González[2], Jimena Arguedas-Castro[3], Juan David Bolaños-Acosta[4], Adrián Navarro-Quesada[5]

Fecha de recepción: 8 de diciembre, 2025
Fecha de aprobación: 21 de abril, 2026

Solís-Ramírez, G; Ruiz-González, M.J; Arguedas-Castro, J; Bolaños-Acosta, J.D; Navarro-Quesada, A. Aplicaciones de microorganismos en la biorremediación de suelos mineros contaminados con metales pesados. *Tecnología en Marcha*. Vol. 39 Nº 4. Octubre-Diciembre, 2026. Pág. 77-90.

https://doi.org/10.18845/tm.v39i4.8339

1 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
g.solis.1@estudiantec.cr
https://orcid.org/0009-0008-9425-8091
2 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
m.ruiz.1@estudiantec.cr
https://orcid.org/0009-0000-1358-8999
3 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
j.arguedas.3@estudiantec.cr
https://orcid.org/0009-0008-3546-2754
4 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
j.bolanos.3@estudiantec.cr
https://orcid.org/0009-0006-9156-8620
5 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
adriannq@estudiantec.cr
https://orcid.org/0009-0002-3422-9850

Palabras clave

Bioabsorción; biomineralización; biotransformación; fijación; lixiviación.

Resumen

La minería industrial, tanto como la artesanal, suelen acarrear un considerable daño ambiental que puede verse agravado debido a la contaminación residual en el área. Entre los contaminantes más persistentes se encuentran los metales pesados, los cuales pueden contribuir a una toxicidad del suelo que previene la actividad biológica. La biorremediación, a través del uso de microorganismos como *Bacillus sp.*, *Pseudomonas sp.*, o *Mucor sp.* se muestra como una tecnología prometedora. A través de mecanismos como la biotransformación o la biosorción, estos microorganismos son capaces de transformar metales en especies menos nocivas, fijarlos a través de moléculas externas, o incluso absorberlos en su interior permitiendo la recuperación de la actividad biológica en el ecosistema. También se ha observado el amplio potencial para eficientizar dichos procesos a través de técnicas de mejoramiento genético, abriendo una valiosa área de acción para investigaciones biotecnológicas. Estudios acerca de la aplicación de microorganismos en la biorremediación de metales pesados en terrenos de explotación agrícola, o cuerpos de agua demuestran su potencial y sientan las bases para extender su aplicabilidad en otros contextos de contaminación, como los suelos de explotación minera. Para este último caso, la evidencia disponible proviene principalmente de la bioprospección de cepas microbianas resistentes en el sitio, y su posterior evaluación en condiciones de laboratorio, por lo que su validación mediante ensayos a escala piloto representa la siguiente etapa en la línea de investigación.

Keywords

Bioabsorption; biomineralization; biotransformation; fixation; leaching.

Abstract

Industrial mining, as well as artisanal mining, often causes considerable environmental damage that can be exacerbated by residual contamination in the area. Among the most persistent pollutants are heavy metals, which can contribute to soil toxicity that hinders biological activity. Bioremediation, through the use of microorganisms such as Bacillus, Pseudomonas, or Mucor sp., is emerging as a promising technology. Through mechanisms such as biotransformation or biosorption, these microorganisms are capable of transforming metals into less harmful species, binding them through external molecules, or even absorbing them internally, allowing for the recovery of biological activity in the ecosystem. The broad potential to enhance these processes through genetic improvement techniques has also been observed, opening a valuable field of action for biotechnological research. Studies on the use of microorganisms for the bioremediation of heavy metals in agricultural lands or bodies of water demonstrate their potential and lay the groundwork for extending their application to other contaminated contexts, such as mining sites. Regarding the latter, available evidence stems primarily from the bioprospecting of resistant microbial strains at the site and subsequent laboratory evaluation; therefore, validation through pilot-scale trials represents the next stage in this line of research.

Introducción

La minería ya sea industrial o artesanal es un sector productivo de gran importancia en múltiples economías alrededor del globo [1]. Sin embargo, esta industria se asocia con una destrucción a largo plazo del ambiente donde se lleva a cabo. La compactación del suelo, la desertificación, la pérdida de actividad biológica, emisiones de efecto invernadero, lluvia ácida, y contaminación por metales pesados son solo algunos de los fenómenos que se asocian con la actividad minera [2-4]. Uno de los factores más persistentes que llevan a que estos ecosistemas no se logren recuperar, es la presencia de metales pesados, por lo que los esfuerzos de remediación contribuyen a restaurar estas regiones [5].

De manera general, los metales pesados son un grupo de metales con una alta densidad, además de un elevado número atómico [6]. Estos elementos se pueden dividir entre metales esenciales como el hierro, el zinc, o el manganeso; y metales tóxicos como el plomo, el cadmio, o el arsénico [7]. Para fines de este documento, sólo se hará hincapié en metales tóxicos aunque no es de olvidarse que incluso, en concentraciones elevadas, los metales esenciales pueden llegar a ser tóxicos [8]. En un amplio rango de industrias, la liberación de metales pesados, se puede dar en forma de subproductos o como reactivos importantes para la realización de distintas actividades, aunado a su capacidad de acumularse indefinidamente en el ambiente [9] y su nocividad tanto para organismos animales, como vegetales [10][11].

La biorremediación de metales pesados corresponde a un proceso de gran importancia en la investigación científica reciente, que corresponde a remover, inmovilizar y desintoxicar el ambiente contaminado mediante organismos como lo pueden ser bacterias, hongos, cianobacterias y otros [12]. Por ejemplo, algunas comunidades microbianas poseen metabolismos distintos que permiten la formación de sustancias orgánicas a la vez que interactúan con metales tóxicos, mientras que otros participan en la liberación de nanopartículas naturales que ayudan a reducir la concentración de contaminantes en el medio. El estudio de estos microorganismos para su uso como biocatalizadores en la transformación de contaminantes en el suelo conlleva a investigaciones y conocimiento más amplio en genómica, transcriptómica, biología sintética y otros, que ofrecen a la biotecnología un área de acción para la creación de sistemas biológicos complejos que permitan recuperar la salud del suelo [13].

Metodología

Para la presente revisión sistematizada se consultaron únicamente fuentes publicadas en los últimos 10 años dándole prioridad a las fuentes pertinentes más recientes. Se consultaron las bases de datos de Google Scholar, Science Direct, y SciELO además de numerosos repositorios universitarios utilizando palabras clave como “bioremediation”, “heavy metal contamination”, “microbial consortia”, “mining industry”, “remediation”, “bioremediation mechanisms”, “lixiviation”, “bioleaching”, “genetic engineering”, “bioaccumulation”, “biosorption”, “biotransformation”, “biomineralization”, “policies”, “legislation”, y sus complementarios en español. Además se realizó investigación de seguimiento con la bibliografía relevante de las fuentes citadas siempre limitándose al marco de tiempo definido. Se excluyó literatura la cual no se encontrara indexada en una de las fuentes anteriormente mencionadas.

En lo referente a la legislatura, convenios, y políticas pertinentes al área de la biorremediación en casos de aplicación a suelos con contaminación minera, se realizó un sondeo en Google, y la base de datos de la Asamblea Legislativa de Costa Rica, además de bases de datos de otros organismos como la ONU haciendo uso de palabras clave como “policies”, “legislation”, “bioremediation”, “heavy metal contamination”, “mining industry”, “industrial contamination” y sus complementarios en español. En lo que concierne a estas fuentes, se ignoró el marco de

tiempo definido de 10 años considerando que en muchos casos, la política vigente puede ser antigua o estar desactualizada. Se excluyeron aquellas fuentes que no aplicaran a los temas del estudio.

Contaminantes de la explotación minera, microorganismos y consorcios

Dentro de los principales contaminantes de la explotación minera alrededor del mundo se encuentran el Cd, Pb, Zn, Cu, Hg, Fe y Ni; los cuales han sido encontrados y analizados en lugares como el Amazonas, Ecuador, Corea y Marruecos. Estos contaminantes metálicos no solo representan una amenaza inmediata para la salud humana, sino que también deterioran ecosistemas enteros. Desde 1989 hasta el 2020, se pudo evidenciar un claro enriquecimiento metálico en áreas de minería en la cuenca amazónica, con concentraciones hasta 100 veces superiores a los valores de fondo natural, superando los estándares internacionales de calidad ambiental tanto acuática como de sedimento; dentro de los contaminantes principales, en mayor volumen se encuentra el mercurio. Es ampliamente utilizado en procesos de amalgamación en la minería artesanal. Al liberarse al ambiente se acumula en organismos acuáticos, transfiriéndose a lo largo de la cadena alimentaria, incluído el consumo de peces por los habitantes de las zonas dependientes de estos alimentos, exponiéndose a posibles efectos neurológicos e inmunológicos [14][15].

Incluso en suelos contaminados por metales pesados u otros subproductos de la explotación minera, se ha observado la persistencia de actividad microbiológica tolerante [16]. Algunos microorganismos de suelo pueden contribuir a la remediación de contaminación por metales pesados, donde se destaca el uso de bacterias de los géneros *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Geobacter*, *Streptomyces*, y *Ochrobactrum* [17]. Tal es el caso de *Mucor rouxii*, cuya biomasa ha demostrado capacidades de biosorción de cobre [18], además de cadmio, plomo, y níquel [19]. Otros ejemplos del uso de organismos fúngicos para la remediación de metales pesados incluye el uso de géneros como *Aspergillus*, *Mucor*, *Rhizopus*, *Penicillium*, y *Coprinopsis* [20]. Por ejemplo el uso de *Aspergillus niger* para la remediación de cadmio y plomo [21][22]. También es de interés la capacidad de algunos de los microorganismos remediadores de formar consorcios para lograr una biorremediación más efectiva. Destacable es el caso de un consorcio conformado por *Achromobacter denitrificans*, *Klebsiella oxytoca*, y *Rhizobium radiobacter* el cual se ha observado, logra biorremediar cantidades considerables de Hg, Cd, Pb, y Ni por mecanismo de biosorción, inclusive llegando a observarse una mayor calidad de fijación de contaminantes al asociarse con la planta *Trifolium pratense L.* [23].

Lixiviación

La lixiviación hace referencia al proceso en el cual los metales pesados presentes en fases sólidas del suelo se solubilizan y son arrastrados por el agua aprovechando la porosidad del suelo. Condiciones de pH ácido, una alta concentración de complejantes orgánicos e inorgánicos, y reacciones redox son típicos contribuyentes al movimiento de metales pesados en el suelo [24]. Cuando se habla de lixiviación generalmente se hace bajo una perspectiva negativa, sin embargo este proceso que ocurre por naturaleza también puede ser aprovechado para extraer los metales pesados de suelos contaminados, lo que se ha denominado como biolixiviación [25]

Se ha logrado utilizar microorganismos como *Acidithiobacillus spp*. para la biolixiviación de suelos mineros. Estos organismos producen sustancias, como ácido sulfúrico, que ayudan a aumentar la solubilidad de otros sulfuros metálicos, mientras que hongos y algunas bacterias heterótrofas producen ácidos orgánicos y surfactantes que ayudan a movilizar metales pesados, los cuales luego pueden ser recuperados [24].

Por otro lado, otra estrategia es contener los metales pesados para disminuir la cantidad de los mismos que se pueda lixiviar, por lo que se enfatiza más su inmovilización. Al aumentar la capacidad de intercambio catiónico del suelo, junto con el pH, mediante el uso de productos como el biochar, se disminuye la disponibilidad y movilidad de los metales [26]. Combinar esta estrategia con otros materiales como compost o minerales activos resultó en sinergias positivas, lo que disminuye la concentración de metales en el agua del suelo, lo que a su vez ayuda a la fitoestabilización [27][28].

En casos específicos de drenaje de minas, se ha realizado una lixiviación intensiva de metales mediante la oxidación de sulfuros. Para esto se utilizan bacterias reductoras de sulfato que ayudan a precipitar los metales en forma de sulfuros más estables, lo que causa un aumento en el pH de la zona trabajada [29][30].

La lixiviación y la biorremediación trabajan de forma sinérgica para disminuir la contaminación por metales pesados: la lixiviación controlada ayuda a movilizar los metales, los cuales son luego extraídos mediante otros mecanismos de biorremediación como la bioacumulación, o la biosorción, evitando que los minerales residuales en el suelo que no lograron recuperarse, sean absorbidos por otros organismos [31].

Biotransformación y Biomineralización

La biotransformación es el mecanismo a través del cual un organismo es capaz de alterar un compuesto, para aprovecharlo, o neutralizarlo [32]. Para lograr este objetivo, existen múltiples rutas tales como la biomineralización mediada por enzimas, a través de la cual se convierte un metal de una forma tóxica a una menos nociva, que, a su vez, se trata de uno de los métodos más comunes y eficientes para la eliminación de metales pesados [12]. Esto se puede ver por ejemplo en bacterias aeróbicas resistentes al mercurio, que pueden transformarlo de su forma CH_3Hg^+ a su forma elemental Hg(II), la cual es 100 veces menos tóxica en el ecosistema [33]. Esto, por lo tanto, también facilita su eliminación de cuerpos de agua y suelos [34]. Otro mecanismo de biotransformación en el marco de la biorremediación, puede ser la bioprecipitación, a través de la cual, un organismo fija moléculas dañinas en forma de quelatos, aislándolos y neutralizándolos [23].

Los hongos, bacterias, y otros microorganismos del suelo permiten la formación de moléculas bioaprovechables, al alterar las propiedades físicas y químicas de los compuestos tóxicos [35]. La actividad bacteriana, inicialmente, es clave en los procesos de biomineralización. Las bacterias reductoras de sulfatos son bacterias anaerobias que usan los sulfatos como aceptor de electrones, por tanto, pueden formar precipitados insolubles con metales contaminantes disueltos en el suelo al reducir sulfato (SO_4^{2-}) a sulfuro (S^{2-}) [36]. Estas han demostrado actividad eficaz con metales pesados como zinc, níquel, cadmio, manganeso, hierro, plomo, cobre y cromo [34][37][38]. Algunas bacterias que cumplen con esta actividad son las pertenecientes a los géneros *Desulfovibrio* y *Desulfotomaculum* [39].

Otras bacterias, como *Bacillus* y *Comamonas*, participan en procesos de precipitación de carbonatos inducida por microbios. Estas son conocidas por ser bacterias con acción ureolítica, lo cual, las convierte en un mecanismo eficaz en la degradación de la urea a través de enzimas ureasas, resultando en amoniaco y dióxido de carbono que, al disolverse en

agua, forma ácido carbónico [40]. Esta reacción aumenta el pH y desplaza el equilibrio del carbonato, formando iones que reaccionan con metales como zinc, níquel, y cadmio para formar minerales insolubles [41]. Se ha encontrado que el mineral producto de la precipitación (polimorfos de carbonato como calcita, dolomita, vaterita, entre otros) depende de factores tanto bióticos como abióticos más que del proceso metabólico de las bacterias [42]. El papel de los hongos en la precipitación por carbonatos también es de gran importancia. Hongos como *Rhodotorula sp.* utilizan enzimas como la anhidrasa carbónica, que cataliza la hidratación y deshidratación del dióxido de carbono en ácido carbónico, elevando el pH y facilitando la precipitación de sales [43]. Este proceso también se puede dar con otro tipo de procesos metabólicos, como fotosíntesis, fijación de nitrógeno, reducción de sulfatos o reducción de nitrato, entre otros [44]. Otros hongos, como descomponedores de la madera (*Serpula himantioides, Serpula lacrymans, Coniophora puteana, Antrodia xantha*), tienen la capacidad de formar oxalatos de metales insolubles como plomo, cobre y manganeso debido a que producen ácido oxálico, lo que ofrece un potencial de investigación importante [45].

Seguidamente, la precipitación por fosfatos es otro método importante de mineralización inducido por bacterias como *Bacillus megaterium, Enterobacter sp.* y *Pseudomonas sp.* [46-48]. Los microorganismos secretan fosfatasas que hidrolizan fuentes de fósforo, generando fosfato (PO_4), capaz de reaccionar con metales y formar, nuevamente, sales de fosfato cuya solubilidad es mucho menor a los minerales de carbonato [46]. La precipitación por fosfatos es mucho menor en este caso, pero se considera que tiene mayor estabilidad mineral y puede inmovilizar metales como cadmio, cobre, plomo, zinc y uranio [49].

Biosorción y bioacumulación

La biosorción es la capacidad que posee la materia orgánica, ya sea viva o muerta, de incorporar en sí misma metales pesados gracias a procesos físico químicos de absorción, adsorción y desorción [50]. Estos procesos son adaptables para múltiples organismos, pues no es necesario que estos estén vivos para cumplir la función de aislante o “encapsulantes biológicos” [51], entre los más utilizados están los hongos, con los cuales en los últimos años se han obtenido resultados alentadores respecto a la biorremediación en metales pesados como el cadmio, plomo, mercurio, zinc o selenio [52].

Ejemplos de biosorción son los estudios de Vallejo Aguilar *et al* [50], de R. Sharma *et al* [53] o de Rozman [54], donde se pusieron a prueba hongos como *Pleurotus ostreatus*, *Ganoderma lucidum, Talaromyces islandicus* y *Aspergillus terreus* con soluciones con Pb, Cr y Cd disueltos. En pruebas con estos metales se obtuvieron porcentajes de fijación de hasta un 80% o más (según el tratamiento), a excepción del tratamiento con cadmio de Vallejo, en donde tan solo se eliminó un 2,25% debido a la presencia de otro ión metálico, con el cuál se presentó “antagonismo de biosorción”. Por el otro lado, Vallejo Aguilar *et al* también indicó que no se obtuvieron concentraciones de plomo y cromo en medio sólido capaces de inhibir el crecimiento de las hifas del hongo, lo que aumenta su valor en la biosorción, pues presentará una mayor cantidad de biomasa para ser aprovechada.

Como se mencionó previamente, existen varios factores que determinan la capacidad de biosorción según la materia orgánica y el metal. El pH destaca pues puede solubilizar iones metálicos y generar una menor competencia, sin embargo, dependerá de organismos en específico. Si se trabaja con bacterias, lo ideal son medios neutros o alcalinos [55], mientras que los hongos, se beneficiarán más en medios ácidos. Otros dos factores relevantes son el tiempo y la concentración de materia orgánica, pues ante su aumento, se obtendrá un incremento en la captación del metal hasta su saturación (no es posible absorber más de forma externa) [56]. Esta capacidad de absorción se atribuye a la cantidad de grupos funcionales como alcoholes,

carbonilos y aminas, pues al tratarse de iones metálicos, poseen carga positiva, capaz de enlazarse con los grupos, generando sales metálicas [52]. La biosorción no solo se limita al reino fungi, pues las bacterias también son capaces de actuar como "biocápsulas". El uso de *Bacillus cereus*, *Acinetobacter sp.*, *Micrococcus sp.*, *Rhodococcus opacus*, entre otros, para captar metales, logrando una remoción del medio de hasta un 90% [57-60].

Estos resultados resaltan las altas capacidades que tienen los organismos para ser utilizados como agentes biorremediadores y la ventana de oportunidades para generar programas de tratamiento de residuos. Nuñez [52], incluso propuso diseños de compostaje a base de residuos urbanos. A pesar de ello, se debe tomar en cuenta el acceso por parte de compañías a este tipo de tecnologías y realizar una comparación entre costos y beneficios previo a su implementación [61].

Por otro lado, existe la bioacumulación, también llamada biosorción dependiente del metabolismo. Este proceso se entiende como la acumulación en un organismo, de sustancias nocivas hasta el punto en que estas superan la concentración ambiental. Este fenómeno radica en la excreción de las moléculas nocivas ocurriendo a un ritmo menor que su absorción, lo que lleva a un incremento en su concentración dentro del organismo [5]. Este proceso, a diferencia de la biosorción, requiere la inversión de energía por parte del organismo, pues muchas veces está ligado a la biotransformación de estas sustancias a moléculas menos tóxicas [62] [63]. En este campo destacan las bacterias extremófilas, pues son capaces de desarrollarse en ambientes con niveles extremos de pH (muy ácidos o muy alcalinos) y con presencia de sustancias tóxicas. Ejemplos de estas son la *T. ferrooxidans*, bacteria capaz de oxidar el hierro y el azufre inorgánico para obtener energía, además de otras especies como *A. indicireducens*, *A. pelagium*, *Fontibacter sp.*, *P. donghaensis* y *Bacillus subtilis,* capaces de acumular metales como Cd, Cr, Cu, Fe, Pb o Zn [64].

La bioacumulación, al conllevar una inversión metabólica por parte de la célula, requiere a su vez que esta se encuentre viva y en buena condición. Además, es posible que el organismo pueda seguir creciendo a medida que absorbe metales, mas, únicamente si se logra sustentar adecuadamente, pues estos iones ingresan por las mismas vías que sus nutrientes esenciales [65]. Para cumplir con esto, los organismos deben poder cambiar el estado iónico de los metales, procesos que permiten su solubilización de estos, para posteriormente sufrir reacciones de oxido-reducción, quelación, metilación, entre otros para pasar de un estado de oxidación más alto a uno menor. Por ejemplo, *Thiobacillus ferroxidans* y *T. thiooxidans* son capaces de realizar oxidación enzimática de metales como el uranio.

El primer paso de la bioacumulación consiste en el "secuestro extracelular", donde moléculas como citrato, ácido oxálico, glomalina, polifenoles y otras ajenas a la membrana celular salen al espacio extracelular e interaccionan con metales pesados [5]. A partir de este punto, entran en juego vias para el ingreso a la célula a través de la membrana, donde actúan sideróforos, canales de iones, endocitosis, permeabilidad compleja y de lípidos, entre otros, según la sustancia a ingresar [66][67].

Durante la bioacumulación, la célula no sale ilesa, se producen reducciones en la actividad enzimática, interrupciones en el ciclo celular e incluso daños en el ADN [13]. Por esta razón, se han aplicado estudios para unir a dos organismos con gran capacidad de biorremediación, hongos o bacterias con plantas. Muchos de estos organismos (como hongos endógenos) son capaces de promover el crecimiento de la planta hospedera, a la par que permitir una mejor absorción y tolerancia a metales como el Pb, Cd, o Hg [68][69].

Potencial de mejoramiento genético

Gracias al desarrollo de la ingeniería genética y herramientas afines, se han podido aprovechar los microorganismos genéticamente modificados para la biorremediación de metales. Para esto, se han empleado técnicas como la sobreexpresión de proteínas o péptidos, alteración de rutas redox en bacterias, y diseño de biosensores, junto con estrategias híbridas, para optimizar los procesos de inmovilización, transformación y recuperación de metales pesados del ambiente.

La expresión de metalotioneínas ha sido un tema altamente explotado para la biorremediación de suelos, siendo un ejemplo claro del potencial de mejoramiento genético. Las metalotioneínas son proteínas ricas en cisteína que poseen una alta afinidad por los metales pesados como cadmio y plomo, lo que las vuelve extremadamente útiles en la biorremediación de metales pesados mediante la quelación de metales. Estas son conocidas por su gran capacidad antioxidante debido a su contenido de grupos sulfhidrilo. Estos grupos sulfhidrilo junto con la cisteína poseen un rol crucial en la quelación de metales [70]. La incorporación de los genes codificantes de metalotioneínas en bacterias en estudios de laboratorio ha logrado mejorar la capacidad de captura de estos metales pesados, así como aumentar la tolerancia celular a metales pesados bajo condiciones tóxicas. Se ha logrado evidenciar un aumento significativo de la adsorción de cadmio en *Escherichia coli* mediante la expresión superficial de metalotioneínas [71]. Por otra parte, se ha sistematizado el uso de péptidos derivados de estas proteínas, ya que han demostrado potencial para aplicaciones en entornos más complejos fuera del laboratorio, como la biorremediación de suelos [72]. Se ha comprobado el potencial del uso de cepas probióticas para la expresión de metalotioneínas recombinantes para disminuir la biodisponibilidad de cadmio en modelos biológicos, lo que demuestra su aplicabilidad en microbios de rizosfera [73]. Otro complemento para la expresión de metalotioneínas es el uso de materiales como nanopartículas de selenio (Se) para potenciar la captura de de plomo y cadmio, aplicables a diversas condiciones ambientales [74]. Estas proteínas permiten modificar organismos que las aprovechen y sean aplicables a la biorremediación de diferentes ambientes.

Por otro lado, un ejemplo claro del uso de técnicas de mejoramiento se evidencia en el uso de péptidos quelantes sintéticos, los cuales son pequeñas cadenas de aminoácidos con alta afinidad por iones metálicos gracias a la presencia de grupos funcionales como cisteína, histidina, ácido glutámico, y ácido aspártico. Debido a su afinidad por los iones metálicos, se pueden seleccionar, e incluso diseñar, péptidos específicos que maximicen su afinidad por algún metal a biorremediar, como por ejemplo el cadmio [72]. Se han utilizado bibliotecas de "phage display" para seleccionar el péptido más idóneo, el cual luego es expresado en la superficie de una levadura lo que maximiza la biosorción [75].

La biorremediación también se puede dar mediante el aprovechamiento de las rutas redox bacterianas, las cuales pueden ser modificadas para que transformen especies altamente tóxicas en formas menos móviles y dañinas. Con esta estrategia se ha trabajado principalmente con cromo presente en suelos contaminados por minería, mediante la aceleración de la reducción del mismo de Cr(VI) a Cr(III), una versión menos soluble. Esto se logra mediante la sobreexpresión de reductasas específicas, como ChrR y YieF [76]. Se han encontrado cepas bacterianas capaces de mantener una reducción rápida y eficiente incluso en presencia de una gran gama de metales, como generalmente se encuentran en los suelos mineros [77]. Se encontró que la manipulación del operón Ars permite la creación de bacterias que ayudan a la detoxificación del arsénico (As), funcionando como biosensores ambientales [78]. Estos biosensores junto con los circuitos genéticos son un gran área de innovación aplicable a la biorremediación de suelos. Estos circuitos están basados en promotores sensibles a metales, entre los cuales destacan ArsR para el arsénico, MerR para mercurio (Hg), y CzcD para el cobalto (Co). Estos activan genes específicos cuando existe la presencia de los contaminantes y reducen la carga metabólica [79].

En suelos afectados por drenaje ácido, se han aprovechado microorganismos acidófilos para movilizar metales pesados. Entre ellos destaca *Acidithiobacillus ferrooxidans,* cuya capacidad para crecer en pH bajos y tolerar altas concentraciones de metales pesados como hierro, cobre y zinc se pueden aprovechar en estrategias de mejoramiento genético. Esta resistencia se deriva de adaptaciones genómicas que incluyen genes asociados al manejo de metales como el operón Mer y diversos transportadores de flujo, junto con la síntesis de hopanoides y antiportadores Na+/H+ que mantienen la homeostasis celular en ambientes altamente ácidos [80].

Se ha profundizado en la implementación de estrategias híbridas combinando microorganismos modificados con la aplicación de diversos materiales. Entre estas combinaciones destacan la utilización de *Bacillus cereus* junto con biochar para disminuir la disponibilidad de metales en suelos de mina fosfatada, y también contribuye a una mejor diversidad microbiana mediante la influencia en la regulación de genes de resistencia a metales entre los que destacan zitB, czcD, zntA y cmtR [81]. Asimismo, se ha determinado que el biochar ayuda a regular el pH, la capacidad de intercambio catiónico, y la porosidad del suelo, lo que ayuda a crear mejores condiciones para los microorganismos que se insertan en el suelo [82].

A pesar del potencial de las estrategias de mejoramiento genético para la biorremediación de metales pesados, su aplicación en ecosistemas mineros abiertos representa un desafío de bioseguridad y regulación ambiental, ya que la liberación deliberada de microorganismos recombinantes conlleva riesgos ecológicos difíciles de predecir y de revertir una vez que el microorganismo se ha establecido en el ambiente [83]. A nivel internacional, el Convenio Sobre la Diversidad Biológica (CDB) en su artículo 8(g) exige a los Estados Parte establecer o mantener medios para regular, administrar, o controlar los riesgos derivados de la liberación de organismos modificados biotecnológicamente que puedan tener efectos adversos sobre la diversidad biológica [84].

En el caso de Costa Rica, este mandato es puesto en efecto mediante la Comisión Técnica Nacional de Bioseguridad (CTNBio) [85], creada mediante la Ley de Protección Fitosanitaria N°7664 [86] y su reglamento (Decreto Ejecutivo N°26921-MAG) [87], así como de las garantías de seguridad ambiental establecidas en la Ley de Biodiversidad N°7788 [88]. Bajo esta normativa se dispone la creación de mecanismos para regular la liberación de organismos genéticamente modificados con el fin de proteger la integridad de los ecosistemas. Sin embargo, el alcance operativo de estos instrumentos limitan explícitamente su aplicación a organismos vivos modificados de uso agrícola, sin contemplar un procedimiento equivalente para la liberación de microorganismos modificados con fines de remediación ambiental en sitios de exploración minera, lo que deja un vacío normativo para la eventual implementación de estas estrategias en el país.

Conclusión

A partir de la evidencia revisada, los microorganismos tanto de forma individual como en consorcio demuestran un potencial considerable para la biorremediación de metales pesados mediante mecanismos como la biosorción, la biotransformación, la bioacumulación, y biomineralización. Gran parte de esta evidencia proviene de estuarios en terrenos de explotación agraria, cuerpos de agua contaminados, o de ensayos a escala de laboratorio. Sin embargo, esto no representa una incompatibilidad de métodos, ya que estas mismas técnicas de biorremediación pueden ser adaptadas para su aplicación en casos de contaminación en suelos mineros

El uso de bacterias como *Bacillus*, *Acinetobacter*, o *Thiobacillus*, así como hongos como *Pleurotus*, *Ganoderma*, o *Aspergillus*, junto con consorcios microbianos y asociaciones con plantas se han observado como estrategias efectivas a la hora de extraer, fijar, o neutralizar estos contaminantes que de otra manera contribuirían a la toxicidad del suelo.

Finalmente, es resaltable el amplio potencial de mejoramiento genético en gran medida inexplotado que podría llegar a eficientizar esta tecnología volviendola un mecanismo de remediación aún más práctico.

Referencias

[1] A. K. Kirsanov y S.-S. Sh. Saaya, «Global mining in the 21st century: An overview», *J. Geogr. Cartogr.*, vol. 7, n.º 1, p. 6090, jun. 2024, doi: 10.24294/jgc.v7i1.6090.

[2] A. A. Tella y N. D. Nathaniel D. Danjibo, «The Environmental Impact of Mining Activities in the Local Community: A Structural Equation Modelling Approach», *IJSW*, vol. 11, n.º 1, p. 44, feb. 2024, doi: 10.5296/ijsw.v11i1.21747.

[3] W. Vilela-Pincay, M. Espinosa-Encarnación, and A. Bravo-González, "La contaminación ambiental ocasionada por la minería en la provincia de El Oro," *Estudios de la Gestión*, no. 8, pp. 215–233, 2020.

[4] S. C. Pal et al., «Anthropogenic drivers induced desertification under changing climate: Issues, policy interventions, and the way forward», Progress in Disaster Science, vol. 20, p. 100303, dic. 2023, doi: 10.1016/j.pdisas.2023.100303.

[5] S. Verma, P. Bhatt, A. Verma, H. Mudila, P. Prasher, y E. R. Rene, «Microbial technologies for heavy metal remediation: effect of process conditions and current practices», Clean Techn Environ Policy, vol. 25, n.º 5, pp. 1485-1507, jul. 2023, doi: 10.1007/s10098-021-02029-8.

[6] S. Kumari y A. Mishra, «Heavy Metal Contamination», en Soil Contamination - Threats and Sustainable Solutions, M. L. Larramendy y S. Soloneski, Eds., IntechOpen, 2021. doi: 10.5772/intechopen.93412.

[7] G. Abdel-Rahman, «Heavy metals, definition, sources of food contamination, incidence, impacts and remediation: A literature review with recent updates», Egypt. J. Chem., vol. 0, n.º 0, pp. 0-0, jul. 2021, doi: 10.21608/ejchem.2021.80825.4004.

[8] S. E. A. Abdel Haleem, «Management of Acute Ferrous Sulfate Poisoning Using Activated Charcoal Monotherapy: A Case Report», Cureus, dic. 2023, doi: 10.7759/cureus.49972.

[9] M. Vijaya Kumar y H. Prasad Raju, «Heavy Metals in the Environment: Sources, Fate, and Health Implications», en Groundwater Resource Management Planning Strategies, V. Sunitha, B. Muralidhara Reddy, Y. Sudharshan Reddy, M. Prasad, B. Pradeep Kumar, y E. Balaji, Eds., en Springer Water. , Cham: Springer Nature Switzerland, 2025, pp. 135-153. doi: 10.1007/978-3-031-88870-0_5.

[10] I. Tahir y K. A. Alkheraije, «A review of important heavy metals toxicity with special emphasis on nephrotoxicity and its management in cattle», Front. Vet. Sci., vol. 10, p. 1149720, mar. 2023, doi: 10.3389/fvets.2023.1149720.

[11] S. Mitra et al., «Impact of heavy metals on the environment and human health: Novel therapeutic insights to counter the toxicity», Journal of King Saud University - Science, vol. 34, n.º 3, p. 101865, abr. 2022, doi: 10.1016/j.jksus.2022.101865.

[12] S. Mallick, T. Pradhan, y S. Das, "Bacterial biomineralization of heavy metals and its influencing factors for metal bioremediation", *J Environ Manage*, vol. 373, p. 123977, ene. 2025, doi: 10.1016/j.jenvman.2024.123977.

[13] V. Pande, S. C. Pandey, D. Sati, P. Bhatt, y M. Samant, "Microbial Interventions in Bioremediation of Heavy Metal Contaminants in Agroecosystem", *Front. Microbiol.*, vol. 13, may 2022, doi: 10.3389/fmicb.2022.824084.

[14] A. Barakat, O. E. Harti, y W. Ennaji, «ENVIRONMENTAL POLLUTION FROM HEAVY METALS IN SOILS SURROUNDING THE ABANDONED MINE OF TANSRIFT (CENTRAL HIGH-ATLAS, MOROCCO)», *The Journal Agriculture And Forestry*, vol. 68, n.º 2, jun. 2022, doi: 10.17707/agricultforest.68.2.16.

[15] G. M. Moulatlet *et al.*, «A systematic review on metal contamination due to mining activities in the Amazon basin and associated environmental hazards», *Chemosphere*, vol. 339, p. 139700, jul. 2023, doi: 10.1016/j.chemosphere.2023.139700.

[16] S.-J. Chun, Y.-J. Kim, Y. Cui, y K.-H. Nam, «Ecological network analysis reveals distinctive microbial modules associated with heavy metal contamination of abandoned mine soils in Korea», Environmental Pollution, vol. 289, p. 117851, nov. 2021, doi: 10.1016/j.envpol.2021.117851.

[17] S. Verma, P. Bhatt, A. Verma, H. Mudila, P. Prasher, y E. R. Rene, «Microbial technologies for heavy metal remediation: effect of process conditions and current practices», Clean Techn Environ Policy, vol. 25, n.º 5, pp. 1485-1507, jul. 2023, doi: 10.1007/s10098-021-02029-8.

[18] L. Dusengemungu, G. Kasali, C. Gwanama, y K. O. Ouma, «Recent Advances in Biosorption of Copper and Cobalt by Filamentous Fungi», Front. Microbiol., vol. 11, p. 582016, dic. 2020, doi: 10.3389/fmicb.2020.582016.

[19] T. A. Kurniawan et al., «Heavy Metal Removal from Aqueous Solutions Using Biomaterials and/or Functional Composites: Recent Advances and the Way Forward in Wastewater Treatment Using Digitalization», J. Compos. Sci., vol. 7, n.º 2, p. 84, feb. 2023, doi: 10.3390/jcs7020084.

[20] N. Vaid, J. Sudan, S. Dave, H. Mangla, y H. Pathak, «Insight Into Microbes and Plants Ability for Bioremediation of Heavy Metals», Curr Microbiol, vol. 79, n.º 5, p. 141, may 2022, doi: 10.1007/s00284-022-02829-1.

[21] O. M. El-Mahdy, H. I. Mohamed, y A. M. Mogazy, «Biosorption effect of Aspergillus niger and Penicillium chrysosporium for Cd- and Pb-contaminated soil and their physiological effects on Vicia faba L.», Environ Sci Pollut Res, vol. 28, n.º 47, pp. 67608-67631, dic. 2021, doi: 10.1007/s11356-021-15382-4.

[22] J. Qiu et al., «Experimental and modeling studies of competitive Pb (II) and Cd (II) bioaccumulation by Aspergillus niger», Appl Microbiol Biotechnol, vol. 105, n.º 16-17, pp. 6477-6488, ago. 2021, doi: 10.1007/s00253-021-11497-3.

[23] V. V. Atuchin, L. K. Asyakina, Y. R. Serazetdinova, A. S. Frolova, N. S. Velichkovich, y A. Yu. Prosekov, «Microorganisms for Bioremediation of Soils Contaminated with Heavy Metals», Microorganisms, vol. 11, n.º 4, p. 864, mar. 2023, doi: 10.3390/microorganisms11040864.

[24] E. K. Sarkodie *et al.*, "A review on the bioleaching of toxic metal(loid)s from contaminated soil: Insight into the mechanism of action and the role of influencing factors," *Front. Microbiol.*, vol. 13, Dec. 2022. doi: 10.3389/fmicb.2022.1049277

[25] X. Zheng *et al.*, "Remediation of heavy metals polluted soil environment: A critical review on biological approaches," *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, vol. 284, Oct. 2024, Art. no. 116883. doi: 10.1016/j.ecoenv.2024.116883

[26] Z.-R. Gu *et al.*, "Research Progress on the Application of Biochar in the Remediation of Heavy Metals in Tailings Soil," *Polish Journal of Environmental Studies*, vol. 33, no. 3, pp. 3123–3138, 2024, doi: 10.15244/pjoes/176043

[27] X. Nie *et al.*, "Advances in Soil Amendments for Remediation of Heavy Metal-Contaminated Soils: Mechanisms, Impact, and Future Prospects," *Toxics*, vol. 12, no. 12, p. 872, 2024. doi: 10.3390/toxics12120872

[28] Chafik *et al.*, "Synergistic Effects of Compost and Biochar on Soil Health and Phytoremediation in Mining Wastes," *Agronomy*, vol. 15, no. 6, p. 1295, 2025. doi: 10.3390/agronomy15061295

[29] I. M. S. Anekwe and Y. M. Isa, "Bioremediation of Acid Mine Drainage – Review," *Alex. Eng. J.*, vol. 65, pp. 1047–1075, 2023. doi: 10.1016/j.aej.2022.09.053.

[30] C. Leng *et al.*, "Preparation and Screening of SRB Gel Particles Used for Acid Mine Drainage Treatment," *Processes*, vol. 12, no. 4, p. 704, 2024. doi: 10.3390/pr12040704.

[31] L. Xu *et al.*, "A Review on Remediation Technology and the Standards/Evaluation of Heavy Metal-Contaminated Soils," *Toxics*, vol. 12, no. 12, p. 897, 2024. doi: 10.3390/toxics12120897.bro

[32] R. Miglani et al., «Degradation of Xenobiotic Pollutants: An Environmentally Sustainable Approach», Metabolites, vol. 12, n.º 9, p. 818, ago. 2022, doi: 10.3390/metabo12090818.

[33] A. Saeid, L. Cepoi, M. Jastrzębska, y P. N. Nomngongo, «Bioremediation of Heavy Metal Ions Contaminated Soil», en Soil Bioremediation, 1.ª ed., J. A. Parray, A. H. Abd Elkhalek Mahmoud, y R. Sayyed, Eds., Wiley, 2021, pp. 87-114. doi: 10.1002/9781119547976.ch5.

[34] L. Liao, Q. Li, Y. Yang, R. Xu, y Y. Zhang, "Immobilization Behavior and Mechanism of Cd2+ by Sulfate-Reducing Bacteria in Anoxic Environments", *Water*, vol. 16, núm. 8, p. 1086, ene. 2024, doi: 10.3390/w16081086.

[35] B. Aytekin, A. Mardani, y Ş. Yazıcı, "State-of-art review of bacteria-based self-healing concrete: Biomineralization process, crack healing, and mechanical properties", *Construction and Building Materials*, vol. 378, p. 131198, may 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131198

[36] S. Si, Y. Ke, B. Xue, Z. Zhang, y X. Zhu, "Immobilized sulfate reducing bacteria (SRB) enhanced passivation performance of biochar for Zn", *Science of The Total Environment*, vol. 892, p. 164556, sep. 2023, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.164556.

[37] Y. Dong *et al.*, "Study on the Effectiveness of Sulfate Reducing Bacteria to Remove Heavy Metals (Fe, Mn, Cu, Cr) in Acid Mine Drainage", *Sustainability*, vol. 15, núm. 6, p. 5486, ene. 2023, doi: 10.3390/su15065486.

[38] BAKHTIAR y SUKOSO, "Use of sulfate-reducing bacteria and different organic fertilizer for bioremediation of ex-nickel mining soils", *Scientific Review Engineering and Environmental Sciences (SREES)*, vol. 30, núm. 4, pp. 561–572, 2021, doi: 10.22630/PNIKS.2021.30.4.47.

[39] Y. Dong *et al.*, "Study on the effectiveness of sulfate-reducing bacteria to remove Pb(II) and Zn(II) in tailings and acid mine drainage", *Front. Microbiol.*, vol. 15, mar. 2024, doi: 10.3389/fmicb.2024.1352430.

[40] D. Arias, K. Gallardo, M. Saldana, y F. Galleguillos-Madrid, "Urease-Driven Microbially Induced Carbonate Precipitation (MICP) for the Circular Valorization of Reverse Osmosis Brine Waste: A Perspective Review", *Minerals*, vol. 15, núm. 5, p. 543, may 2025, doi: 10.3390/min15050543.

[41] A. Rajasekar *et al.*, "Removal of high concentrations of zinc, cadmium, and nickel heavy metals by Bacillus and Comamonas through microbially induced carbonate precipitation", *Biodegradation*, vol. 36, núm. 3, p. 40, may 2025, doi: 10.1007/s10532-025-10131-7.

[42] A. Rajasekar, S. Wilkinson, y C. K. S. Moy, "MICP as a potential sustainable technique to treat or entrap contaminants in the natural environment: A review", *Environmental Science and Ecotechnology*, vol. 6, p. 100096, abr. 2021, doi: 10.1016/j.ese.2021.100096.

[43] N. A. Awadeen, M. Eltarahony, S. Zaki, A. Yousef, S. El-Assar, y H. El-Shall, "Fungal carbonatogenesis process mediates zinc and chromium removal via statistically optimized carbonic anhydrase enzyme", *Microbial Cell Factories*, vol. 23, núm. 1, p. 236, ago. 2024, doi: 10.1186/s12934-024-02499-7.

[44] S. H. Shivaprakash y S. E. Burns, "Microbial interactions during carbonate biomineralization via urea hydrolysis metabolic pathway", *Acta Geotech.*, vol. 20, núm. 8, pp. 3929–3950, ago. 2025, doi: 10.1007/s11440-025-02609-8.

[45] D. Y. Vlasov, M. S. Zelenskaya, A. R. Izatulina, S. Y. Janson, y O. V. Frank-Kamenetskaya, "Oxalate Crystallization under the Action of Brown Rot Fungi", *Crystals*, vol. 13, núm. 3, p. 432, mar. 2023, doi: 10.3390/cryst13030432.

[46] Z.-F. Xue, W.-C. Cheng, M. M. Rahman, L. Wang, y Y.-X. Xie, "Immobilization of Pb(II) by *Bacillus megaterium*-based microbial-induced phosphate precipitation (MIPP) considering bacterial phosphorolysis ability and Ca-mediated alleviation of lead toxicity", *Environmental Pollution*, vol. 355, p. 124229, ago. 2024, doi: 10.1016/j.envpol.2024.124229.

[47] G. Zeng *et al.*, "The effect of phosphate solubilizing bacteria on the fate of cadmium immobilized by microbial induced phosphate precipitation", *J Environ Manage*, vol. 380, p. 125125, abr. 2025, doi: 10.1016/j.jenvman.2025.125125.

[48] Y. Kato, S. Kimura, T. Kogure, y M. Suzuki, "Deposition of Lead Phosphate by Lead-Tolerant Bacteria Isolated from Fresh Water near an Abandoned Mine", *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 23, núm. 5, p. 2483, ene. 2022, doi: 10.3390/ijms23052483.

[49] D. Peng *et al.*, "Effect of phosphate-mineralized bacteria on multi-metals migration behavior in vanadium tailing slags: Coexistence of immobilization and mobilization", *Journal of Hazardous Materials*, vol. 480, p. 135880, dic. 2024, doi: 10.1016/j.jhazmat.2024.135880.

[50] M. L. A. Vallejo Aguilar *et al.*, «Biosorción y tolerancia de Pb, Cr y Cd por la biomasa de Pleurotus ostreatus (Jacq. Ex Fr.) P. Kumm», *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, vol. 12, n.º 2, pp. 275-289, mar. 2021, doi: 10.29312/remexca.v12i2.2687.

[51] B. V. Tangahu, M. Berlianto, y A. A. G. Kartika, «Deconcentration of Chromium Contained in Wastewater Using a Bacteria and Microalgae Consortia with a High Rate Algal Reactor System», Accedido: 29 de septiembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.jeeng.net/Deconcentration-of-Chromium-Contained-in-Wastewater-Using-a-Bacteria-and-Microalgae,126878,0,2.html

[52] W. E. Nuñez, D. A. Sotomayor, C. V. Ballardo, y E. Herrera, «Potencial de la biomasa fúngica: producción y mecanismos de biorremediación de metales pesados del compost de residuos sólidos orgánicos municipales», *Scientia Agropecuaria*, vol. 14, n.º 1, pp. 79-91, ene. 2023, doi: 10.17268/sci.agropecu.2023.008.

[53] R. Sharma *et al.*, «Bioremediation potential of novel fungal species isolated from wastewater for the removal of lead from liquid medium», *Environmental Technology & Innovation*, vol. 18, p. 100757, may 2020, doi: 10.1016/j.eti.2020.100757.

[54] U. Rozman, G. Kalčíková, G. Marolt, T. Skalar, y A. Žgajnar Gotvajn, «Potential of waste fungal biomass for lead and cadmium removal: Characterization, biosorption kinetic and isotherm studies», *Environmental Technology & Innovation*, vol. 18, p. 100742, may 2020, doi: 10.1016/j.eti.2020.100742.

[55] E. Rojas, «Influencia del Nostoc commune en la biosorción in vitro de metales pesados en agua contaminada», feb. 2025, Accedido: 29 de septiembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://hdl.handle.net/20.500.14597/9129

[56] S. Sundararaju, A. Manjula, V. Kumaravel, T. Muneeswaran, y T. Vennila, «Biosorption of nickel ions using fungal biomass Penicillium sp. MRF1 for the treatment of nickel electroplating industrial effluent», *Biomass Conv. Bioref.*, vol. 12, n.º 4, pp. 1059-1068, abr. 2022, doi: 10.1007/s13399-020-00679-0.

[57] L. Pérez-Bou *et al.*, «Biosorción de cinc y cadmio por bacterias inactivadas pretratadas», *Minería y Geología*, vol. 37, n.º 1, pp. 90-104, mar. 2021.

[58] A. M. Rodrigues-Pimentel, P. Reynoso-Quispe, R. J. Cabello-Torres, y L. G. Valdiviezo-Gonzales, «Bioadsorción de Co(II) y Mn(II) en soluciones acuosas por la bacteria Rhodococcus opacus», *Tecnología y ciencias del agua*, vol. 13, n.º 4, pp. 225-275, jul. 2022, doi: 10.24850/j-tyca-2022-04-05.

[59] J. V. Rodríguez Eugenio, «Biosorción de plomo mediada por consorcios microbianos en biorreactores Air Lift», 2024, Accedido: 28 de septiembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://hdl.handle.net/20.500.14292/2871

[60] M. M. Cayllahua Ramos y L. Gonzales Carhuapoma, «BIOSORCIÓN DE COBRE (Cu) Y PLOMO (Pb) PROVENIENTES DE RELAVES MINEROS MEDIANTE EL USO DE BIOMASA MICROBIANA, MINA BUENAVENTURA - JULCANI», oct. 2020, Accedido: 28 de septiembre de 2025. [En línea]. Disponible en: http://repositorio.unh.edu.pe/handle/UNH/3321

[61] M. A. F. Cerna, E. A. J. Segura, J. J. M. Fukomoto, J. S. M. O. Tantapoma, y O. H. R. Qusipe, «Tecnologías de biorremediación frente a métodos tradicionales para manejar los tratamientos de residuos industriales de países en desarrollo (2005 – 2025)», *Gestión de Operaciones Industriales*, vol. 4, n.º 1, pp. 48-59, ago. 2025, doi: 10.17268/goi4.0.2025.03.

[62] P. Carriquiriborde, *Biodisponibilidad, bioconcentración, bioacumulación y biomagnificación de los contaminantes*. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (EDULP), 2021. Accedido: 28 de septiembre de 2025. [En línea]. Disponible en: http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/131168

[63] A. Santana-Flores *et al.*, «Aislamiento e identificación de bacterias tolerantes y bioacumuladoras de metales pesados, obtenidas de los jales mineros El Fraile, México», *Terra Latinoamericana*, vol. 38, n.º 1, pp. 67-75, mar. 2020, doi: 10.28940/terra.v38i1.430.

[64] J. D. la C. Jiménez Venegas, «Bacterias extremófilas como herramienta para la remediación de relaves mineros», 2024, Accedido: 29 de septiembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/204305

[65] N. D. Nnaji, H. Onyeaka, T. Miri, y C. Ugwa, «Bioaccumulation for heavy metal removal: a review», *SN Appl. Sci.*, vol. 5, n.º 5, p. 125, abr. 2023, doi: 10.1007/s42452-023-05351-6.

[66] S. Pasricha, V. Mathur, A. Garg, S. Lenka, K. Verma, y S. Agarwal, «Molecular mechanisms underlying heavy metal uptake, translocation and tolerance in hyperaccumulators-an analysis: Heavy metal tolerance in hyperaccumulators», *Environmental Challenges*, vol. 4, p. 100197, ago. 2021, doi: 10.1016/j.envc.2021.100197.

[67] Z. Yang *et al.*, «Heavy metal transporters: Functional mechanisms, regulation, and application in phytoremediation», *Science of The Total Environment*, vol. 809, p. 151099, feb. 2022, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.151099.

[68] W. Pietro-Souza *et al.*, «Mercury resistance and bioremediation mediated by endophytic fungi», *Chemosphere*, vol. 240, p. 124874, feb. 2020, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.124874.

[69] R. Chaturvedi *et al*, «Harnessing Pisum sativum-Glomus mosseae symbiosis for phytoremediation of soil contaminated with lead, cadmium, and arsenic», *Int J Phytoremediation*, vol. 23, n.º 3, pp. 279-290, 2021, doi: 10.1080/15226514.2020.1812507.

[70] R. Yang, D. Roshani, B. Gao, P. Li, and N. Shang, "Metallothionein: A comprehensive review of its classification, structure, biological functions, and applications," *Antioxidants*, vol. 13, no. 7, Art. 825, 2024, doi: https://doi.org/10.3390/antiox13070825

[71] H. He, Y. Tang, X. Li, et al., "Surface expression of metallothionein enhances bioremediation in *Escherichia coli*," *Desalination and Water Treatment*, vol. 317, p. 100070, 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100070

[72] Y. Luo, Y. Zhang, Z. Xiong, X. Chen, A. Sha, W. Xiao, L. Peng, L. Zou, J. Han, and Q. Li, "Peptides used for heavy metal remediation: A promising approach," *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 25, no. 12, Art. 6717, Jun. 2024, doi: https://doi.org/10.3390/ijms25126717

[73] C. Zou, Y. Chen, H. Li, W. Li, J. Wei, Z. Li, X. Wang, T. Chen, and H. Huang, "Engineered Bacteria EcN-MT Alleviate Liver Injury in Cadmium-Exposed Mice via its Probiotics Characteristics and Expressing of Metallothionein," *Frontiers in Pharmacology*, vol. 13, 2022, Art. no. 857869, doi: https://doi.org/10.3389/fphar.2022.857869

[74] Z. Zhou, Y. Dong, L. Zhu, X. Xia, S. Li, G. Wang, and K. Shi, "Effective and stable adsorptive removal of cadmium(II) and lead(II) using selenium nanoparticles modified by microbial SmtA metallothionein," *Chemosphere*, vol. 307, p. 135818, 2022. doi: https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135818

[75] S. Wang, L. Shi, Y. Guo, H. Chen, and Z. Xu, "Enhanced biosorption of cadmium ions on immobilized surface-engineered yeast using cadmium-binding peptides," *Frontiers in Microbiology*, vol. 15, Art. no. 1496843, 2024. doi: https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1496843

[76] N. N. Ramli, R. Omar, and S. C. Tan, "Bacterial metabolic pathways for Cr(VI) reduction: A review," *Chemosphere*, vol. 320, p. 138001, Mar. 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.micres.2022.127288

[77] P. Yin, Z. Wu, R. Lv, Z. Long, Y. Huang, T. Chen, X. Ye, Z. Zhu, and L. Zou, "Characteristics and mechanism of rapid Cr(VI) reduction and multiple heavy metal tolerance in *Cytobacillus firmus* isolated from chromium residue soil," *Chemical Engineering Journal*, vol. —, no. —, Art. 166268, 2025, doi: https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.166268

[78] M. A. E. Naiel, E. S. Taher, F. Rashed, S. Ghazanfar, A. M. Shehata, N. A. Mohammed, R. Pascalau, L. Smuleac, A. M. Ibrahim, A. Abdeen, and M. Shukry, "The arsenic bioremediation using genetically engineered microbial strains on aquatic environments: An updated overview," *Heliyon*, vol. 17, p. e36314, 2024, doi:https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36314

[79] S. Mathur, R. Sharma, and P. Gupta, "Genetic circuits in microbial biosensors for heavy metal detection," *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Gene Regulatory Mechanisms*, vol. 1866, no. 2, p. 194959, Feb. 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2023.02.031

[80] T. Peng *et al.*, "Genomic and transcriptomic analyses reveal adaptation mechanisms of an Acidithiobacillus ferrivorans strain YL15 to alpine acid mine drainage," *PLoS ONE*, vol. 12, no. 5, p. e0178008, May 2017, doi: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0178008

[81] Y. Zhang, J. Peng, Z. Wang, F. Zhou, J. Yu, R. Chi, and C. Xiao, "Metagenomic analysis revealed the bioremediation mechanism of lead and cadmium contamination by modified biochar synergized with *Bacillus cereus* PSB-2 in phosphate mining wasteland," *Frontiers in Microbiology*, vol. 16, Art. no. 1529784, 2025, doi: https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1529784

[82] P. Ouyang, M. Narayanan, X. Shi, X. Chen, Z. Li, Y. Luo, and Y. Ma, "Integrating biochar and bacteria for sustainable remediation of metal-contaminated soils," *Sustainable Remediation*, vol. 5, Art. no. 63, 2023, doi: https://doi.org/10.1007/s42773-023-00265-3

[83] A. Lerner *et al.*, "Genetically Modified Microorganisms: Risks and Regulatory Considerations for Human and Environmental Health," *Microorganisms 2026, Vol. 14, Page 467*, vol. 14, no. 2, p. 467, Feb. 2026, doi: 10.3390/MICROORGANISMS14020467.

[84] Naciones Unidas, *Convenio sobre la Diversidad Biológica*, Río de Janeiro, 5 de junio de 1992, art. 8(g). [En línea]. Disponible en: https://www.cbd.int/doc/legal/cbd-es.pdf

[85] Ministerio de Agricultura y Ganadería, *Comisión Técnica Nacional de Bioseguridad (CTNBio)*, Servicio Fitosanitario del Estado, Costa Rica. [En línea]. Disponible en: https://www.sfe.go.cr

[86] Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica, *Ley de Protección Fitosanitaria*, N.° 7664, 8 de abril de 1997. [En línea]. Disponible en: https://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=43939

[87] Ministerio de Agricultura y Ganadería, *Reglamento a la Ley de Protección Fitosanitaria*, Decreto Ejecutivo N.° 26921-MAG, 20 de marzo de 1998. [En línea]. Disponible en: https://pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=43150&nValor3=92975&strTipM=TC

[88] Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica, *Ley de Biodiversidad*, N.° 7788, 30 de abril de 1998. [En línea]. Disponible en: https://pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=39796&nValor3=74714&strTipM=TC

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores declaramos haber utilizado *Claude* para múltiples tareas: la revisión gramatical y de estilo y la traducción de secciones. Todos los resultados e información asistidos por IA fueron revisados, verificados y validados minuciosamente por los autores, quienes asumen plena responsabilidad por la precisión, coherencia e integridad del contenido publicado..

Efecto de la suplementación con aditivos ricos en capsaicina en la producción de rumiantes: una revisión[1]

Effect of capsaicin-rich additives on ruminant production: a review

Kenneth Matamoros-Corella[2], Mónica Madrigal-Valverde[3]

Fecha de recepción: 1 de diciembre, 2025
Fecha de aprobación: 19 de abril, 2026

Matamoros-Corella, K; Madrigal-Valverde, M. Efecto de la suplementación con aditivos ricos en capsaicina en la producción de rumiantes: una revisión. *Tecnología en Marcha*. Vol. 39 Nº 4. Octubre-Diciembre, 2026. Pág. 91-101.

https://doi.org/10.18845/tm.v39i4.8341

1 El presente estudio forma parte del proyecto de investigación 5402-2151-1018: Efecto de un producto aditivo fitoterapéutico en la dinámica ovárica, variables sanguíneas y producción en vacas lecheras cruzadas en sistemas de producción tropicales. Inscrito en VIE-ITCR.

2 Escuela de Agronomía, Campus Tecnológico Local San Carlos, Instituto Tecnológico de Costa Rica, San Carlos, Costa Rica.
kenneth.matamoros@estudiantec.cr
https://orcid.org/0000-0002-0827-9726

3 Escuela de Agronomía y Área académica del Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo, Campus Tecnológico Local San Carlos, Instituto Tecnológico de Costa Rica, San Carlos, Costa Rica.
mmadrigal@itcr.ac.cr
https://orcid.org/0000-0002-4688-0627

Palabras clave

Fitobiótico; ácidos grasos volátiles; microbiota ruminal; *Capsicum*, aditivo.

Resumen

En la producción animal se emplea la suplementación alimenticia. Esta práctica consiste en suministrar nutrientes necesarios a los animales. Entre los productos que se pueden incluir en la suplementación se encuentran los aditivos. Dentro de los aditivos, a su vez, se encuentran los bioactivos, que cuentan con propósitos tecnológicos y zootécnicos, tal es el caso de los derivados del chile picante (extractos ricos en capsaicina o oleorresina de *Capsicum*). Este compuesto es investigado a nivel mundial debido a que se ha comprobado que posee efectos sobre parámetros de importancia en la producción animal. Por lo anterior, el objetivo de esta investigación bibliográfica fue estudiar los efectos de los compuestos bioactivos ricos en capsaicina sobre la salud, producción y reproducción de rumiantes. Para esto se hizo una búsqueda exhaustiva sobre las investigaciones realizadas entre el 2020-2025 en las Bases académicas suscritas del Instituto Tecnológico de Costa Rica mediante el sistema bibliotecas del TEC. Los artículos principalmente fueron recopilados de las bases Web of science y Sciencedirect. Los criterios de búsqueda que capturaron un mayor número de investigaciones fueron: *Capsicum* sp.*, Capsicum oleoresin.* Se reporta la utilización como herramienta sobre parámetros en la alimentación animal, sanidad animal, manipulación de la microbiota ruminal y, por defecto, la producción de AGVs, así como en parámetros productivos. En conclusión, los compuestos ricos en capsaicina son alternativas para la suplementación estratégica debido a sus propiedades y efectos en rumiantes. Además, el estudio de bioactivos permite aumentar las opciones de aditivos y disminuir el uso excesivo de compuestos sintéticos.

Keywords

Phytobiotic; volatile fatty acids; ruminal microbiota; *Capsicum*, additive.

Abstract

Feed supplementation is used in animal production. This practice consists of providing animals with the necessary nutrients. Products that can be included in supplementation include additives. Among the additives are bioactive ingredients, which have technological and zootechnical purposes, such as derivatives of *Capsicum oleoresin*. This compound is being researched worldwide because it has been proven to have effects on important parameters in animal production. Therefore, the objective of this bibliographic research was to study the effects of capsaicin-rich bioactive compounds on the health, production, and reproduction of ruminants. To this end, a comprehensive search was conducted for research conducted between 2020 and 2025 in the academic databases subscribed to by the Costa Rican Institute of Technology through the TEC library system. The articles were collected primarily from the Web of Science and ScienceDirect databases. The search criteria that generated the largest number of entries were: *Capsicum* sp. and *Capsicum oleoresin*. Their use as a tool for animal nutrition and health, the manipulation of the ruminal microbiota, and, by default, the production of VFAs, as well as their production parameters, are described. In conclusion, capsaicin-rich compounds are alternatives for strategic supplementation due to their properties and effects on ruminants. Furthermore, the study of bioactive compounds allows for expanding the range of additives and reducing the overuse of synthetic compounds.

Introducción

La producción de alimentos de origen animal permite abastecer a las poblaciones de proteína animal. Las características nutricionales que aportan estos alimentos son de importancia en la dieta de las personas. En los sistemas de producción la estrategia de alimentación y suplementación utilizada es de suma importancia tanto para optimizar la producción como para obtener productos aptos para el consumo humano [1]. La suplementación alimenticia es una de las estrategias utilizadas para administrar nutrientes necesarios a los animales [2], este tipo de prácticas ha demostrado aumentar la productividad de los animales, así como su bienestar [1].

Para la suplementación se han utilizado compuestos denominados aditivos, los cuales se incorporan en la dieta de los animales de forma intencional para lograr una alimentación más eficiente [3]. Dentro de los aditivos se encuentran compuestos bioactivos o fitobióticos, los cuales proporcionan un beneficio a la salud. Estos compuestos se encuentran en pequeñas proporciones en los alimentos. Entre los beneficios que presentan se incluyen efectos antioxidantes [4], antibióticos [5], antiparasitarios [6] y antinflamatorios.

Estas propiedades han causado interés en los investigadores debido a que podrían generar un impacto positivo en la alimentación de rumiantes, en las producciones tanto de leche como de carne. En diferentes investigaciones se ha reportado el uso de aditivos de origen vegetal como el extracto de eugenol [7], cinamaldehído, carvacrol [4], aceite esencial de clavo de olor, anís [8] y extracto de *Capsicum oleoresin* [2], [3], [4], [7], [9], [10].

Este último reporta efectos interesantes sobre parámetros de producción, por lo que el objetivo de esta investigación fue estudiar los efectos de los compuestos bioactivos ricos en capsaicina sobre la salud, producción y reproducción de rumiantes.

Materiales y métodos

La información utilizada para la presente investigación bibliográfica fue recopilada durante un periodo de siete meses (enero-julio del año 2025). Los documentos incluidos en la revisión fueron artículos científicos publicados durante enero del 2020 hasta julio del 2025. Para la búsqueda de la información se utilizaron las Bases académicas suscritas del Instituto Tecnológico de Costa Rica mediante el sistema bibliotecas del TEC. Los artículos principalmente fueron recopilados de las bases Web of science y Sciencedirect. Los criterios de búsqueda que capturaron un mayor número de investigaciones fueron: *Capsicum* sp.*, Capsicum oleoresin.* La presente investigación bibliográfica se encuentra dividida en las siguientes secciones: chile picante en la alimentación animal, dinámica ruminal ante la suplementación de capsaicina y efectos productivos por especie.

Compuestos bioactivos en la alimentación animal

En la alimentación animal se utiliza la suplementación estratégica, la cual consiste en añadir en la dieta compuestos que podrían generar un aumento en el rendimiento productivo de los animales [4]. El uso de compuestos sintéticos ha sido una alternativa para aumentar la productividad; sin embargo, debido al mal uso en los sistemas de producción, estos han causado que microorganismos patógenos como *Escherichia coli, Pasteurella multocida* y *Mannheimia haemolytica* generen resistencia [11]. A raíz de esto, muchas investigaciones se han orientado en la búsqueda de alternativas que permitan disminuir su uso. Estudios han utilizado como sujeto de investigación compuestos bioactivos derivados de plantas [12] debido a que poseen propiedades antibióticas, antioxidantes, antiparasitarias y, a su vez, ofrecen beneficios sobre la salud [5], producción [4] y reproducción [13].

Algunas de las investigaciones han utilizado fitobióticos como el extracto de anís, *Yuca schidigera,* aceite esencial de orégano, extracto de timol, mentol y capsaicina. En estos estudios se han probado las diferentes propiedades que poseen para determinar su efecto en variables de producción. Un ejemplo es el extracto de anís, el cual ha sido evaluado en toros suplementados con dosis superiores a 187,5 mg/día (miligramos por día) y se obtuvo que la adición del fitobiótico afecta la proporción de los ácidos grasos volátiles (AGVs) [14]. Además, en novillos de engorde se ha reportado que el uso de *Yucca schidigera* tiene efectos positivos en variables como el total de AGVs a nivel ruminal [15]. La inclusión en altas dosis de fitobióticos como el extracto de timol y mentol disminuyeron el pH salival en vacas Holstein ($p < 0,05$) fistuladas, lo cual podría mejorar la salud ruminal en animales suplementados con dietas ricas en concentrado [10]. Fitobióticos como el aceite esencial de orégano y su extracto han demostrado que, al ser utilizado como aditivos, disminuyen la proporción de los AGVs en el rumen de corderos [16]. Asimismo, en corderos de raza Menemen, el aceite esencial de orégano permitió un aumento sustancial en la grasa intramuscular [17].

Por otra parte, en hembras bufalinas se ha evaluado el ofrecimiento de capsaicina sobre parámetros reproductivos, lo que causó un aumento significativo en la tasa de ovulación y gestación al utilizar 4 mg/kg de alimento [13]. Este último fitobiótico es un derivado del chile picante y ha sido utilizado con diferentes fines zootécnicos que abarcan desde el bienestar animal y así como su efecto en la nutrición [18].

Chile picante como bioactivo en la alimentación animal

El chile picante es una planta de la familia de las solanáceas que contiene en su fruto componentes denominados capsinoides y capsacinoides, los cuales son los que le otorgan la sensación picante del chile. Dentro de los compuestos capsacinoides se encuentran la capsaicina y la Dihidroxi-capsaicina. Debido a las propiedades que presentan los extractos ricos en capsaicina muchos investigadores los han incluido en diferentes estudios para determinar sus efectos sobre el comportamiento digestivo, absorción de nutrientes [19] y en la productividad de los animales [4].

Algunos de los estudios se han realizado en vacas Holstein fistuladas y han demostrado que dosis bajas de capsaicina (10 ppm/2,5 kg MS) presentan un efecto significativo sobre la capacidad buffer salival y tiende a reducir el pH, lo cual podría mejorar la salud ruminal en animales alimentados con dietas altas en concentrados [10]. También han determinado que suplementar con dosis bajas de capsaicina (10 mg/kg MS) aumenta significativamente el consumo de materia seca y el tiempo de alimentación en vacas Holstein [20]. Además, se ha reportado que el extracto de capsaicina posee efectos sobre el crecimiento en animales en producción; en el caso de terneros lactantes, se ha probado que añadir dosis altas (0,3 mL/día) en el suplemento de leche mejora la capacidad antioxidante en sangre [21]. Otras investigaciones han reportado que el uso de mezclas que contienen capsaicina en la dieta poseen efectos positivos sobre la salud de ovejas. Los resultados de un estudio indican que administrar 180 mg/kg de alimento permite mejorar el sistema inmune, así como la digestión de nutrientes [19].

Efectos de la capsaicina sobre la salud animal

El extracto rico en capsaicina (composición química: flavonoides, carotenoides, vitaminas C, E, D y capsaicinoides) también se ha probado en la búsqueda de soluciones a problemas sanitarios [21]. Se ha demostrado que el extracto de capsaicina *in vitro* inhibe la formación de *Candida* y el desarrollo de *Toxoplasma gondii* en muestras de sangre de cordero [22]. Otros

estudios describen que el uso de dosis altas de capsaicina (0,3 mL/día) disminuyen en terneros las diarreas asociadas a *Eggerthella, Streptococcus, Enterococcus* y *Enterobacteriaceae* [21]. Asimismo, el uso de capsaicina hidrosoluble disminuye de manera significativa la tasa de respiración y la abundancia relativa de *Mycoplasma* en el tracto respiratorio [23]. En novillos cruzados (Angus x Chalorais) destetados no se encontró un impacto sobre la salud al administrar en la dieta una mezcla de fitobióticos [24].

En vacas lactantes se han reportado efectos positivos sobre el confort térmico, de manera que su uso ha disminuido la temperatura del pelaje y ha aumentado el tiempo de los animales en el área de alimentación [25]. Además, en un metaanálisis realizado a diferentes artículos, se encontró que la inclusión del fitobiótico aumenta la concentración de glucosa sérica ($p < 0,05$), pero no los niveles de urea y la concentración de los ácidos grasos no esterificados en vacas Holstein durante el periodo de lactancia [26].

Dinámica ruminal ante la suplementación de capsaicina

La capsaicina ha sido evaluada por diferentes investigadores por los efectos que posee a nivel ruminal [14]. Estas evaluaciones se han realizado en especies de bovinos [27] *in vitro* [28] e *in vivo* [29]. Muchas de las investigaciones estudian el efecto que posee el fitobiótico es estas especies sobre la producción de metano entérico [8], poblaciones microbianas [29] y sobre la producción de AGVs [30], por lo cual, para una mayor compresión, se han divido los resultados obtenidos en tres subsecciones.

Emisión de metano entérico

La adición de capsaicina también ha sido utilizada en la alimentación animal como estrategia para disminuir la producción de metano entérico. Estudios han encontrado que en vacas del grupo racial Holstein en fase de lactancia, la producción de metano (CH_4) disminuye ($p < 0,05$) al administrar compuestos fitobióticos (clavo de olor y *Capsicum oleoresin*) [8]. También se ha demostrado que el uso de mezclas comerciales (Cinnamaldehído 5,5%, eugenol 9,5% y *Capsicum oleoresin* 3,5%) en vacas de grupo racial Nordic red en lactancia provoca una disminución ($p < 0,01$) en la producción de CH_4 entérico cuando se adiciona 1,2 gramos en la dieta [7]. De la misma forma, otros autores han investigado esta mezcla, pero en vacas Holstein y no encontraron efectos significativos ($p > 0,05$) en la producción diaria de CH_4 [12].

Poblaciones microbianas

A nivel ruminal también se ha investigado cómo la inclusión de capsaicina (95 % capsaicinoides) afecta la distribución de las poblaciones microbianas [31]. Estudios realizados en vacas Holstein en lactancia han probado que la inclusión de *Capsicum* sp. (0,06 % de la dieta total) disminuye las poblaciones de bacterias que podrían estar asociadas a condiciones de acidosis en rumiantes como lo son *Selenomonas ruminantium*, *Succinimonas amylolytica* y *Streptococcus bovis* [30]. En corderos se ha incluido en la dieta mezclas comerciales que contienen *Capsicum oleoresin* y han encontrado que al utilizarlo causa un aumento en las poblaciones de *Olsenella*, *Schwartzia*, *Erysipelotrichaceae*_UCG-002, *Sphaerochaeta*, así como disminución de la abundancia relativa de Acidobacteriota, Chloroflexi y Gemmatimonadota [29].

También, en condiciones *in vitro* se ha evaluado el efecto del fitobiótico de CAP y la temperatura sobre la microbiota ruminal, el cual demostró que en condiciones hipertérmicas (42 °C), hubo incremento en la abundancia relativa ($p < 0,01$) de *Butyrivibrio fibrisolvens* y, a su vez, disminuyó significativamente las poblaciones de protozoarios (*Fibrobacter succinogenes*) [28].

Distribución de los ácidos grasos volátiles a nivel ruminal

Además, se ha investigado el efecto de la adición de capsaicina sobre la proporción de los AGVs en diferentes especies a nivel ruminal como el búfalo (*Bubalus bubalis*). Estudios han revelado que la adición de *C. oleoresin* disminuye la proporción de propionato ($p < 0,05$) y, a su vez, causa un aumento en el porcentaje de acetato ($p = 0,04$) [9]. En corderos se encontró que al añadir 300 mg/kg del extracto de chile picante disminuye significativamente la concentración de acetato, propionato, butirato, isobutirato, valerato, así como la relación de acetato-propionato a nivel ruminal [16].

También en esta especie se evaluó la inclusión de *Capsicum oleoresin* a una dosis de 80 mg/kg de dieta y no obtuvo efectos significativos en la proporción de propionato y butirato, pero sí hubo tendencia a incrementar la proporción de butirato ($p = 0,04$) y disminuir ($p = 0,10$) la proporción de propionato [29].

En bovinos de leche se ha probado que la inclusión de capsaicina aumenta la concentración total de AGVs [30]. Sin embargo, otros estudios han demostrado que al añadir 500 mg/día/vaca de CAP (extracto rico en capsaicina) en la alimentación de hembras Holstein no afecta de forma significativa la concentración total de AGV [27]. Asimismo, en otro estudio se añadió 300 mg/día/vaca de CAP en hembras Holstein y se obtuvo una tendencia ($p = 0,02$) a disminuir la proporción molar del propionato [12].

Otros estudios han evaluado en novillos de engorde Holstein (peso corporal: 229 ± 24 kg), una mezcla de fitbióticos (*Capsicum oleoresin* + aceite de anís) a diferentes dosis de inclusión (250 mg/día y 500 mg/día) y obtuvieron que, al incorporar a la dieta de los animales tres partes de aceite de anís más una parte de CAP, hubo una disminución en la relación acetato-propionato y la concentración total de los AGV [14]. En toros (Simmental) alimentados con dietas altas en granos (20:80), hubo una disminución en la concentración total de AGV al añadir 250 mg/día [31]. Estos resultados son similares a los encontrados en toros Angus (peso corporal: 510 ± 41,27 kg) debido a que, al añadir 1,5 gramos de CAP, se obtuvo una disminución ($p < 0,01$) en la concentración total de AGV [15].

A nivel *in vitro* se ha estudiado el uso de capsaicina y se ha demostrado que al mezclar fitobióticos (aceite de anís + *Capsicum oleoresin*) a diferentes dosis (5 mg/L, 15 mg/L, 30 mg/L), se reduce la proporción de acetato y la relación de acetato-propionato [14]. Bajo condiciones hipertérmicas (42 °C) la capsaicina logró disminuir el porcentaje de acetato y la relación acetato-propionato [28].

Efectos en la producción de rumiantes suplementados con compuestos con capsaicina

A nivel productivo se han encontrado estudios realizados en diferentes especies, en los que se incluyen bovinos, corderos y bufalinos. Por lo cual, para una mejor síntesis y compresión, se han clasificado los resultados en dos subsecciones: pequeños rumiantes y grandes rumiantes.

Pequeños rumiantes

A nivel productivo se ha estudiado el efecto que presenta CAP en pequeños rumiantes. Las variables de investigación incluyen calidad de canal, tasa de crecimiento y conversión alimenticia. En términos de calidad canal, algunos estudios no han encontrado efectos significativos al adicionarlo en la dieta (300 mg/kg de concentrado en corderos)

[17]. Otros estudios no reportan efectos significativos al evaluarlo sobre la conversión alimenticia, consumo de alimento y tasa de crecimiento [16]. Sin embargo, otras investigaciones obtuvieron que al suplementar con CAP a 150 g/tonelada, los animales aumentaron la ganancia de peso diaria [32].

Grandes rumiantes

En grandes rumiantes se ha probado el efecto de CAP en bufalinos [13] y bovinos [4]. Respecto a los sistemas de producción de carne, algunas de estas investigaciones han sido realizadas en novillos y han determinado que, a medida que aumenta la dosis de CAP (77 mg/día a 250 mg/día), lo hace el peso corporal [33]. Otros estudios han probado CAP en combinación con otros compuestos, por ejemplo, en novillos (Chalorais x Angus; peso corporal: 391 ± 34,0 kg) se ha utilizado una mezcla de capsaicina, aceite esencial de clavo de olor y aceite esencial de ajo y se obtuvo que la suplementación con la mezcla no posee un efecto significativo sobre la tasa de crecimiento ($p = 0,09$), crecimiento acumulado ($p > 0,15$) ni características de calidad de canal ($p > 0,15$) [34].

En novillos Holstein se utilizó una mezcla de fitobióticos (17 % eugenol + 11 % cinamaldehído + 7 % capsaicina) y no se obtuvo un efecto significativo sobre el peso final, consumo de materia seca, ganancia diaria promedio ni la eficiencia alimenticia ($p > 0,12$) [35]. También en novillos Holstein se utilizó *Capsicum oleresim* protegida en el rumen, a una dosis de 15 mg/kg de dieta y tampoco hubo efectos significativos en el consumo de materia seca y el peso final, pero sí hubo una tendencia a aumentar la ganancia peso promedio [36]. En búfalos en fase de lactancia también se ha evaluado la inclusión de CAP y se encontró que al incluir el fitobiótico previo al parto, incrementa la lactosa en el calostro ($p < 0,05$), y durante la lactancia, en los becerros, se presenta una mayor concentración de inmunoglobulina G (IgG) ($p < 0,05$) [37].

En búfalos se ha incluido 4 mg/kg de ración y se obtuvo un incremento en la tasa de ovulación ($p < 0,05$), mejoró el porcentaje de leche ($p < 0,05$) y el total de sólidos en leche ($p < 0,05$) [13]. En vacas Jersey en lactación temprana (peso corporal: 370 ± 17 kg) se ha reportado que la inclusión de 150 mg/kg de materia seca de CAP disminuye la proporción de ácido láurico y ácido cáprico en leche ($p < 0,01$) [4]. En vacas Holstein se ha reportado un aumento en el consumo de materia seca, así como un mayor porcentaje de grasa en leche al adicionar 0,75 gramos/día de capsaicina encapsulada en la ración [38].

También en esta raza se ha encontrado que el uso de 100 gramos/día por vaca de CAP encapsulada, tiende a aumentar la producción de leche y la eficiencia alimenticia [2]. En estudios recientes han evaluado la adición de CAP encapsulado en vacas Holstein durante el periodo pre-post parto, el cual obtuvo una tendencia a aumentar el porcentaje de leche ($p = 0,07$), el porcentaje de grasa corregida ($p = 0,03$), así como diferencias significativas respecto a variables de consumo, como lo es la eficiencia alimenticia ($p < 0,03$) [39]. Al utilizar CAP microencapsulado en vacas mestizas (*Bos taurus* x *Bos indicus*, peso corporal: 447,80 ± 89,6 kg) se obtuvo un aumento significativo en la interacción producción de leche por tiempo [40].

Se ha reportado en la raza Holstein una disminución en el conteo de células somáticas al utilizar extracto de CAP como aditivo en la dieta ($p = 0,05$) [39]. En esta raza también se ha estudiado el uso de capsaicina en combinación con otros fitobióticos, por ejemplo, el uso de CAP en combinación con extractos (canela, pimienta, cebolla, uva, *Curcuma sp.* y *Quillaja sp.*) ha aumentado la digestibilidad aparente de la materia seca ($p = 0,047$), consumo de materia seca ($p = 0,001$) y la producción de leche ($p = 0,041$) [41].

Mezclas comerciales (5,5 % de cinamaldehído, 9,5 % eugenol, 3,5 % CAP) se han estudiado en este grupo racial; sin embargo, no se encontraron efectos significativos sobre el consumo de materia seca y eficiencia alimenticia [42]. Combinaciones de CAP con otros bioactivos (té verde, fenogreco) han aumentado la producción de leche ($p = 0,04$) en esta raza.

Discusión

El uso de productos a base de o ricos en capsaicina ha sido evaluado en la alimentación de pequeños y grandes rumiantes como suplemento o aditivo [8], [21], [32]. En diferentes estudios se ha demostrado que la adición del fitobiótico podría tener un impacto a nivel de la salud y bienestar de los animales [23], [25], [43]. Además, al poseer propiedades antibióticas podría ser una alternativa para disminuir el uso excesivo no terapéutico de estos compuestos en la producción animal, los cuales atentan contra la salud del consumidor debido a que algunas bacterias patógenas generan resistencia a estos antibióticos, que también son utilizados en humanos [23].

Asimismo, la adición de capsaicina en las dietas de rumiantes ha sido evaluada sobre parámetros de fermentación ruminal como la producción de metano [7]. Los resultados indican una disminución sobre la producción, lo cual podría estar asociado a los cambios generados en la microbiota, así como el ambiente ruminal [30]. La adición de bioactivos en la dieta de rumiantes disminuye el porcentaje de metano entérico, por ende, a nivel ambiental podría ser una práctica hacia una producción con mayor sostenibilidad, debido que es uno de los principales gases asociados al efecto invernadero [8]. Además, también se ha encontrado una variación en la producción de AGVs al suplementar con capsaicina a los animales. En cuanto a la microbiota ruminal, algunos investigadores han encontrado que al adicionar capsaicina en las dietas de rumiantes se genera un impacto sobre las poblaciones de microorganismos ruminales como algunas de las especies de *Fibrobacter* y *Ruminococus* [26].

A nivel productivo se ha encontrado que algunas de las mezclas de fitonutrientes no presentan un efecto positivo y significativo sobre el consumo de materia seca de vacas. A pesar de ello, es importante recalcar que en estos estudios no se obtuvieron efectos adversos sobre estas variables [4], [8]. En hembras bovinas se ha obtenido resultados positivos sobre la calidad de leche; es decir, el uso del bioactivo ha permitido aumentos significativos sobre parámetros como el porcentaje de grasa y producción de leche [38], [40]. Lo cual también coincide con estudios realizados en búfalas en producción [13], [37].

Conclusiones

Los compuestos ricos en capsaicina son alternativas para la suplementación estratégica, debido a su capacidad antioxidante, antiinflamatoria y antibiótica. Estas propiedades presentan efectos sobre la salud de los animales en variables productivas, así como a nivel ambiental.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Vicerrectoría de Investigación y Extensión por el apoyo en el régimen investigador consolidado.

Referencias

[1] A. Mendoza y Y. Acosta, “Suplementación de vacas a pastoreo con ensilado de grano húmedo de maíz o concentrado comercial”, *Veterinaria Montev*, vol. 56, no. 214, pp. 1-6, 2020. Consultado: 30 jul. 2025. [En línea]. Disponible: http://www.scielo.edu.uy/pdf/vet/v56n214/1688-4809-vet-56-214-e301.pdf

[2] J. Oh *et al.*, "Dietary supplementation with rumen-protected *Capsicum* during the transition period improves the metabolic status of dairy cows", *J Dairy Sci*, vol. 104, no. 11, pp. 11609-1620, nov. 2021, Consultado: 01 de marzo 2025. [En línea]. Disponible: doi: 10.3168/jds.2020-19892.

[3] D. E. Wasson *et al.*, "Lactational performance and hematological effects of capsaicin supplementation in dairy cows: A meta-analysis", *J Dairy Sci*, vol. 107, no. 10, pp. 8009–8020, oct. 2024. Consultado: 01 de marzo 2025.. [En línea]. Disponible: doi: 10.3168/jds.2024-24956.

[4] K. W. Leal *et al.*, "Essential oils and capsaicin in the diet of Jersey cows at early lactation and their positive impact on anti-inflammatory, antioxidant and immunological responses", *Trop Anim Health Prod*, vol. 56, no. 7, sep. 2024. Consultado: 01 de marzo 2025. [En línea]. Disponible: doi: 10.1007/s11250-024-04077-w.

[5] K. Kim *et al.*, "Dietary plant extracts modulate gene expression profiles in alveolar macrophages of pigs experimentally infected with porcine reproductive and respiratory syndrome virus", *J Anim Sci Biotechnol*, vol. 11, no. 1, jul. 2020. Consultado: 01 de marzo 2025. [En línea]. Disponible: doi: 10.1186/s40104-020-00475-w.

[6] C. W. Wells, "Effects of essential oils on economically important characteristics of ruminant species: A comprehensive review", *Animal nutrition (Zhongguo xu mu shou yi xue hui)*, vol. 16, pp. 1-10, oct. 2023. Consultado: 01 de marzo 2025.. [En línea]. Disponible: doi: 10.1016/j.aninu.2023.05.017.

[7] S. M. Tondini *et al.*, "Effect of a blend of cinnamaldehyde, eugenol and *Capsicum oleoresin* on methane emission and lactation performance of Nordic Red dairy cows fed grass silage-based diets", *Livest Sci*, vol. 284, jun. 2024. Consultado: 01 de marzo 2025.. [En línea]. Disponible: doi: 10.1016/j.livsci.2024.105494.

[8] T. Silvestre *et al.*, "Effects of a combination of *Capsicum oleoresin* and clove essential oil on metabolic status, lactational performance, and enteric methane emissions in dairy cows", *J Dairy Sci*, vol. 105, no. 12, pp. 9610-9622, nov. 2022, Consultado: 01 de marzo 2025.. [En línea]. Disponible: doi: 10.3168/jds.2022-22203.

[9] Z. An *et al.*, "Effects of *Capsicum oleoresin* Inclusion on Rumen Fermentation and Lactation Performance in Buffaloes (Bubalus bubalis) during Summer: In Vitro and In Vivo Studies", *Fermentation*, vol. 9, no. 3, mar. 2023. Consultado: 01 de marzo 2025.. [En línea]. Disponible: doi: 10.3390/fermentation9030232.

[10] S. Ricci *et al.*, "Supplementation With Phytogenic Compounds Modulates Salivation and Salivary Physico-Chemical Composition in Cattle Fed a High-Concentrate Diet", *Front Physiol*, vol. 12, jun. 2021. Consultado: 01 de marzo 2025.. [En línea]. Disponible: doi: 10.3389/fphys.2021.645529.

[11] I. Espinosa Castaño *et al.*, "Artículo Reseña Resistencia antimicrobiana en bacterias de origen animal: desafíos para su contención desde el laboratorio Antimicrobial resistance in bacteria from animals, challenges for their contention from laboratory", *Revista de Salud Animal*, vol. 41, no. 3, pp. 1-19, 2019. Consultado: 01 de marzo 2025.. [En línea]. Disponible: http://opn.to/a/6fQBe

[12] L. F. Martins *et al.*, "Lactational performance, enteric methane emission, and nutrient utilization of dairy cows supplemented with botanicals", *J Dairy Sci*, vol. 107, no. 1, pp. 242-257, ene. 2024. Consultado: 15 de febrero 2025. [En línea]. Disponible: doi: 10.3168/jds.2023-23719.

[13] A. Abulaiti *et al.*, "Dietary Supplementation of Capsaicin Enhances Productive and Reproductive Efficiency of Chinese Crossbred Buffaloes in Low Breeding Season", *Animals*, vol. 13, no. 1, ene. 2023. Consultado: 15 de febrero 2025. [En línea]. Disponible: doi: 10.3390/ani13010118.

[14] I. Fandiño, *et al.*, "Dose and combinations of anise oil and *Capsicum oleoresin* as rumen fermentation modifiers in vitro and in vivo with high concentrate diets fed to Holstein beef heifers", *Anim Feed Sci Technol*, vol. 260, feb. 2020. Consultado: 15 de febrero 2025. [En línea]. Disponible: doi: 10.1016/j.anifeedsci.2019.114363.

[15] X. Yi *et al.*, "Effects of Dietary Capsaicin and Yucca schidigera Extracts as Feed Additives on Rumen Fermentation and Microflora of Beef Cattle Fed with a Moderate-Energy Diet", *Fermentation*, vol. 9, no. 1, ene. 2023. Consultado: 15 de febrero 2025. [En línea]. Disponible: doi: 10.3390/fermentation9010030.

[16] H. B. Ünlü, *et al.*, "Effects of oregano essential oil and *Capsicum* extract on fattening, serum constituents, and rumen fermentation of lambs", *S Afr J Anim Sci*, vol. 51, no. 2, pp. 172-179, 2021. Consultado: 15 de febrero 2025. [En línea]. Disponible: doi: 10.4314/sajas.v51i2.4.

[17] H. B. Ünlü, *et al.*, "Effects of oregano essential oil and *Capsicum* extract supplementation on slaughter characteristics, meat quality, and fatty acid composition of lambs", *S Afr J Anim Sci*, vol. 52, no. 6, pp. 780-791, 2022. Consultado: 15 de febrero 2025 . [En línea]. Disponible: doi: 10.4314/sajas.v52i6.04.

[18] C. M. Giacomelli *et al.*, "Encapsulated pepper blend in the diet of confined Holstein bullocks: effect on ruminal volatile fatty acid profiles, growth performance, and animal health", *Trop Anim Health Prod*, vol. 55, no. 2, abr. 2023. Consultado: 15 de febrero 2025. [En línea]. Disponible: doi: 10.1007/s11250-023-03473-y.

[19] X. An *et al.*, "Effects of a blend of cinnamaldehyde, eugenol and *Capsicum oleoresin* (CEC) on growth performance, nutrient digestibility, immune response and antioxidant status of growing ewes", *Livest Sci*, vol. 234, abr. 2020. Consultado: 15 de febrero 2025. [En línea]. Disponible: doi: 10.1016/j.livsci.2020.103982.

[20] E. Castillo-Lopez *et al.*, "Short-term screening of multiple phytogenic compounds for their potential to modulate chewing behavior, ruminal fermentation profile, and pH in cattle fed grain-rich diets", *J Dairy Sci*, vol. 104, no. 4, pp. 4271-4289, abr. 2021. Consultado: 15 de febrero 2025. [En línea]. Disponible: doi: 10.3168/jds.2020-19521.

[21] M. Su *et al.*, "The Effect of Capsaicin on Growth Performance, Antioxidant Capacity, Immunity and Gut Micro-Organisms of Calves", *Animals*, vol. 13, no. 14, jul. 2023. Consultado: 15 de febrero 2025. [En línea]. Disponible: doi: 10.3390/ani13142309.

[22] R. de P. Menezes *et al.*, "Antimicrobial, Antivirulence, and Antiparasitic Potential of *Capsicum* chinense Jacq. Extracts and Their Isolated Compound Capsaicin", *Antibiotics*, vol. 11, no. 9, sep. 2022. Consultado: 16 de febrero 2025. [En línea]. Disponible: doi: 10.3390/antibiotics11091154.

[23] M. Su *et al.*, "Effect of Capsaicin Addition on Antioxidant Capacity, Immune Performance and Upper Respiratory Microbiota in Nursing Calves", *Microorganisms*, vol. 11, no. 8, ago. 2023. Consultado: 16 de febrero 2025. . [En línea]. Disponible: doi: 10.3390/microorganisms11081903.

[24] T. L. Maia Ribeiro *et al.*, "Evaluation of a phytogenic blend fed with monensin on post-weaning growth performance, health, and sera metabolite responses during the initial 56 d feedlot receiving period in steer calves", *Acta Agric Scand A Anim Sci*, vol. 74, no. 1, pp. 18-26, ene. 2025. Consultado: 16 de febrero 2025. . [En línea]. Disponible: doi: 10.1080/09064702.2024.2402696.

[25] S. Peretti *et al.*, "Thermoregulation and Performance of Dairy Cows Subjected to Different Evaporative Cooling Regimens, with or without Pepper Extract Supplementation", *Animals*, vol. 12, no. 22, nov. 2022. Consultado: 16 de febrero 2025.. [En línea]. Disponible: doi: 10.3390/ani12223180.

[26] J. F. Orzuna-Orzuna, *et al.*, "Capsaicin as a Dietary Additive for Dairy Cows: A Meta-Analysis on Performance, Milk Composition, Digestibility, Rumen Fermentation, and Serum Metabolites," *Animals*, vol. 14, no. 7, abr. 2024. Consultado: 16 de febrero 2025. . [En línea]. Disponible: doi: 10.3390/ani14071075.

[27] A. Foskolos *et al.*, "Effects of *Capsicum* and propyl-propane thiosulfonate on rumen fermentation, digestion, and milk production and composition in dairy cows", *Animals*, vol. 10, no. 5, may. 2020. Consultado: 16 de febrero 2025.. [En línea]. Disponible: doi: 10.3390/ani10050859.

[28] Z. An *et al.*, "Effects of *Capsicum oleoresin* supplementation on rumen fermentation and microbial abundance under different temperature and dietary conditions in vitro", *Front Microbiol*, vol. 13, sep. 2022. Consultado: 16 de febrero 2025.. [En línea]. Disponible: doi: 10.3389/fmicb.2022.1005818.

[29] W. Wang *et al.*, "Blend of Cinnamaldehyde, Eugenol, and *Capsicum Oleoresin* Improved Rumen Health of Lambs Fed High-Concentrate Diet as Revealed by Fermentation Characteristics, Epithelial Gene Expression, and Bacterial Community", *Animals*, vol. 13, no. 10, may 2023. Consultado: 16 de febrero 2025.. [En línea]. Disponible: doi: 10.3390/ani13101663.

[30] R. C. B. Grazziotin *et al.*, "Altered rumen fermentation patterns in lactating dairy cows supplemented with phytochemicals improve milk production and efficiency", *J Dairy Sci*, vol. 103, no. 1, pp. 301-312, ene. 2020. Consultado: 16 de febrero 2025.. [En línea]. Disponible: doi: 10.3168/jds.2019-16996.

[31] W. You, *et al.*, "Capsaicin Modulates Ruminal Fermentation and Bacterial Communities in Beef Cattle with High-Grain Diet-Induced Subacute Ruminal Acidosis", *Microorganisms*, vol. 13, no. 1, ene. 2025. Consultado: 16 de febrero 2025. [En línea]. Disponible: doi: 10.3390/microorganisms13010084.

[32] F. Mwangi, *et al.*, "Diet Preference, Feed Efficiency and Expression of the Sodium-Dependent Glucose Transporter Isoform 1 and Sweet Taste Receptors in the Jejunum of Lambs Supplemented with Different Flavours", *Animals*, vol. 13, no. 8, abr. 2023. Consultado: 16 de febrero 2025 . [En línea]. Disponible: doi: 10.3390/ani13081417.

[33] J. C. Eidsvik, *et al.*, "Effects of rumen-protected *Capsicum oleoresin* on dry matter intake, average daily gain, and carcass characteristics of finishing beef steers", *Applied Animal Science*, vol. 38, no. 4, pp. 335-342, ago. 2022. Consultado: 16 de febrero 2025. [En línea]. Disponible: doi: 10.15232/aas.2022-02289.

[34] T. L. M. Ribeiro *et al.*, "Influence of long-term supplementation of a formulated botanical blend on growth performance and carcass traits in feedlot steers", *Anim Biosci*, vol. 38, no. 1, pp. 77-85, ene. 2025. Consultado: 16 de febrero 2025. [En línea]. Disponible: doi: 10.5713/ab.24.0125.

[35] V. N. Gouvêa *et al.*, "Effects of supplemental phytomolecules on growth performance, carcass characteristics and liver abnormalities of finishing beef steers", *J Appl Anim Res*, vol. 49, no. 1, pp. 324-329, 2021. Consultado: 16 de febrero 2025.. [En línea]. Disponible: doi: 10.1080/09712119.2021.1960841.

[36] M. F. Westphalen *et al.*, "Effects of feeding rumen-protected *Capsicum oleoresin* on growth performance, health status, and total tract digestibility of growing beef cattle", *Anim Feed Sci Technol*, vol. 271, ene. 2021. Consultado: 16 de febrero 2025.. [En línea]. Disponible: doi: 10.1016/j.anifeedsci.2020.114778.

[37] Z. An *et al.*, "Prepartum maternal supplementation of *Capsicum oleoresin* improves colostrum quality and buffalo calves' performan", *Front Vet Sci*, vol. 9, 2022. Consultado: 16 de febrero 2025 . [En línea]. Disponible: doi: 10.3389/fvets.2022.935634

[38] P. C. Vittorazzi *et al.*, "Feeding encapsulated pepper to dairy cows during the hot season improves performance without affecting core and skin temperature", *J Dairy Sci*, vol. 105, no. 12, pp. 9542-9551, nov. 2022. Consultado: 16 de febrero 2025. [En línea]. Disponible: doi: 10.3168/jds.2022-22078.

[39] C. S. Takiya *et al.*, "Feeding rumen-protected *Capsicum oleoresin* to dairy cows during the transition period and early lactation: Effects on nutrient digestibility, blood metabolites, and performance", *Anim Feed Sci Technol*, vol. 305, nov. 2023. Consultado: 17 de febrero 2025. [En línea]. Disponible: doi: 10.1016/j.anifeedsci.2023.115758.

[40] M. Madrigal-Valverde *et al.*, "Improving Milk Yield, Milk Quality, and Follicular Functionality Behavior in Dairy Cows from the Implementation of Microencapsulated Chili Pepper Supplements in Their Diets", *Animals*, vol. 14, no. 16, ago. 2024. Consultado: 17 de febrero 2025. [En línea]. Disponible: doi: 10.3390/ani14162361.

[41] C. S. Takiya *et al.*, "Feeding phytogenic ingredients combined or not with Lithothamnium calcareum and a mycotoxin binder to lactating cows: Effects on performance, nutrient digestibility, physiological parameters, and nitrogen excretion", *Anim Feed Sci Technol*, vol. 303, sep. 2023. Consultado: 17 de febrero 2025. [En línea]. Disponible: doi: 10.1016/j.anifeedsci.2023.115718.

[42] L. F. Martins, *et al.*, "Effects of phytonutrients and yeast culture supplementation on lactational performance and nutrient use efficiency in dairy cows", *J Dairy Sci*, vol. 106, no. 3, pp. 1746-1756, mar. 2023. Consultado: 17 de febrero 2025. [En línea]. Disponible: doi: 10.3168/jds.2022-22482.

[43] Z. An *et al.*, "Effects of *Capsicum Oleoresin* Supplementation on Lactation Performance, Plasma Metabolites, and Nutrient Digestibility of Heat Stressed Dairy Cow", *Animals*, vol. 12, no. 6, mar. 2022. Consultado: 17 de febrero 2025. [En línea]. Disponible: doi: 10.3390/ani12060797.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores aquí firmantes declaramos que no se utilizó ninguna herramienta de IA para la conceptualización, traducción o redacción de este artículo.

Diseño y simulación computacional del prototipo de un espectrómetro RMN de campo bajo a base de arreglo Halbach de imanes permanentes de diseño modular para uso en el Instituto Tecnológico de Costa Rica

Design and Computational Simulation of a Modular Low-Field NMR Spectrometer Prototype Based on a Halbach Array of Permanent Magnets for Use at the Costa Rica Institute of Technology

Felipe Montero-Castillo[1], Joshuan Omier-Fernández[2], Jafet Ortiz-Valverde[3], Isaac F. Céspedes-Camacho[4]

Fecha de recepción: 17 de febrero, 2026
Fecha de aprobación: 15 de mayo, 2026

Montero-Castillo, F; Omier-Fernández, J; Ortiz-Valverde, J; Céspedes-Camacho, I.F. Diseño y simulación computacional del prototipo de un espectrómetro RMN de campo bajo a base de arreglo Halbach de imanes permanentes de diseño modular para uso en el Instituto Tecnológico de Costa Rica . *Tecnología en Marcha*. Vol. 39 Nº 4. Octubre-Diciembre, 2026. Pág. 102-122.

https://doi.org/10.18845/tm.v39i4.8480

1 Estudiante de Ingeniería Física en el Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
felipemonterocastillo@gmail.com
https://orcid.org/0009-0000-3191-572X
2 Estudiante de Ingeniería Física en el Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
germaynejoshuan789@gmail.com
https://orcid.org/0009-0008-9251-7790
3 Estudiante de Ingeniería Física en el Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
jafetortizvalverde@gmail.com
https://orcid.org/0009-0001-7416-3406
4 Profesor de la Escuela de Química del Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
icespedes@itcr.ac.cr
https://orcid.org/0000-0003-1514-1343

Palabras clave

Resonancia magnética nuclear; espectroscopía; arreglo de Halbach; instrumentación científica.

Resumen

El presente estudio aborda el diseño y simulación del prototipo de un espectrómetro de Resonancia Magnética Nuclear de campo bajo, basado en un arreglo Halbach modular de imanes permanentes, con el objeto de diseñar un equipo de bajo costo y alta homogeneidad de campo para uso docente e investigativo en el Tecnológico de Costa Rica. En la fase inicial, se evaluaron seis configuraciones geométrico-magnéticas mediante simulaciones estacionarias en COMSOL Multiphysics, variando el número de anillos y tipos de imán de materiales N52 y N55, con un porcentaje de inhomogeneidad de campo de 1,14%. El diseño de seis anillos con imanes N55 logró un campo central de 0,305 T, se opta por utilizar este arreglo de imanes. El espectrómetro se moduló incorporando una sonda RLC en serie con las siguientes propiedades: 1 µH, 8,16 Ω, 150,15 pF, así como con un preamplificador SR560 y un amplificador RF BT00250-AlphaA. La simulación de excitación del pulso de 90° y la generación de señales FID permitieron validar un pico de pulso de 59 µT y una amplitud en el FID experimental de 30 000 a.u. El análisis espectral reveló claramente el doblete característico del sistema XA_1 centrado en la frecuencia de Larmor de 12,986 MHz, confirmando la resolución espectral prevista. La congruencia entre los resultados teóricos y experimentales demuestra la robustez del diseño y su idoneidad para aplicaciones de RMN de campo bajo, ofreciendo una plataforma fiable y económica para futuros estudios y enseñanza.

Keywords

Magnetic resonance; spectroscopy; Halbach array; scientific instrumentation.

Abstract

This study addresses the design and simulation of a low-field Nuclear Magnetic Resonance spectrometer prototype based on a modular Halbach array of permanent magnets. The objective was to develop a low-cost system with high magnetic-field homogeneity for teaching and research purposes at the Costa Rica Institute of Technology. In the initial phase, six geometric–magnetic configurations were evaluated through stationary simulations in COMSOL Multiphysics, varying the number of rings and magnet grades (N52 and N55), achieving a field inhomogeneity of 1,14%. The configuration consisting of six N55 magnet rings produced a central field of 0,305 T, this is the array used. The spectrometer was modeled by incorporating a series RLC probe with the following properties: 1 µH, 8,16 Ω, and 150,15 pF, as well as an SR560 preamplifier and a BT00250-AlphaA RF amplifier. The simulation of the 90° excitation pulse and the generation of free induction decay (FID) signals validated a pulse peak of 59 µT and an experimental FID amplitude of 30,000 a.u. Spectral analysis clearly revealed the characteristic doublet of the XA_1 spin system centered at the Larmor frequency of 12,986 MHz, confirming the expected spectral resolution. The strong agreement between theoretical and experimental results demonstrates the robustness of the design and its suitability for low-field NMR applications, providing a reliable and cost-effective platform for future research and teaching activities.

Introducción

La espectroscopía por Resonancia Magnética Nuclear (RMN) es una técnica altamente utilizada por las ciencias químicas. Esta permite analizar una sustancia sin destruirla o modificar químicamente su entorno, haciendo uso de una propiedad intrínseca de la materia llamada espín. Esta característica dota a la técnica de gran viabilidad para el estudio de componentes y ambientes químicos variados [1].

Con más de setenta años en su haber [1], la investigación enfocada en la misma ha permitido el desarrollo tecnologías de gran importancia para el mundo actual. Entre sus usos, se encuentra el análisis de polímeros [2], estudio de combustibles fósiles y aditivos [3], detección de impurezas [4], monitoreo del traslado de fluidos multifase [5] e incluso observación y caracterización de reacciones químicas [6].

Uno de los principales elementos de un espectroscopio por RMN es el imán, fuente del campo magnético externo que da origen a la precesión de los espines. Existen varios arreglos que varían la intensidad del campo magnético con el fin de realizar análisis más amplios [7][8]; debido a que la resolución del dispositivo depende de la intensidad del campo generado. Algunos sistemas emplean electroimanes, los cuales suelen presentar costos elevados y requieren mecanismos de refrigeración continua para evitar el sobrecalentamiento y mantener la estabilidad del campo magnético. La implementación de estos sistemas de refrigeración representa una de las principales dificultades técnicas, no obstante, los electroimanes pueden generar campos magnéticos de mayor intensidad y con un control más preciso, lo que favorece la obtención de resultados de mayor calidad [9],[10],[11]. Por otro lado, existen arreglos que utilizan imanes permanentes, los cuales pueden ser manufacturados a partir de materiales con distintas capacidades de magnetización [12]. El arreglo que corresponde a este artículo entra en la categoría de imanes permanentes.

Los estudios y aplicaciones en RMN varían dependiendo de la magnitud del campo magnético aplicado. En la actualidad pueden definirse claramente dos grandes regímenes: campo alto y campo bajo, no obstante, en los últimos años el campo ultra bajo y campo cero han alcanzado cierta popularidad [13][14]. Los dispositivos de campo alto se consideran como tal cuando superan valores de campo magnético de 1,5 T [15], con los cuales se pueden observar núcleos como hidrógeno, carbono, flúor y fósforo. Campos magnéticos más altos se pueden considerar de tipo ultra alto e incrementan el rango de núcleos a estudiar [16].

En este artículo se hace especial énfasis en la RMN de campo bajo. Aunque este término suele referirse a campos magnéticos inferiores a 1 T [17], para efectos de esta investigación se considerarán campos comprendidos entre 0,1 T y 1 T. Los equipos de RMN de campo bajo presentan diversas ventajas, entre ellas la versatilidad de diseño, ya que pueden ser compactos e incluso portátiles [18],[19]. Asimismo, permiten el uso de imanes permanentes, lo que reduce significativamente su costo al eliminar la necesidad de materiales superconductores y complejos sistemas de enfriamiento. Además, la homogeneidad del campo magnético, entendida como el grado de uniformidad espacial del campo dentro del volumen de interés, resulta más sencilla de alcanzar y mantener que en equipos de mayor campo, gracias a la implementación de diferentes configuraciones de arreglos de imanes.

Un arreglo que se considera eficaz, y es de los principales elementos de este artículo, es el arreglo de Halbach [20]. Dicho arreglo consiste en una configuración de imanes permanentes individuales orientados de forma que el campo magnético se maximiza en el centro y se minimiza en el exterior. Esta configuración mantiene el campo magnético estable en el centro, detalle de gran importancia para la correcta lectura de señales RMN.

En el contexto del estudio de los bloques del Halbach un factor de suma importancia es la homogeneidad del campo, ya que esta influye en el desplazamiento químico observado en los espectros finales. La correcta caracterización del campo magnético experimental propuesta, resulta vital para el diseño geométrico de los imanes y es necesaria para definir los posibles experimentos a realizar [20],[21].

Costa Rica cuenta, a la fecha, con tres equipos de RMN: dos equipos de campo alto, uno de 400 MHz en la Escuela de Química de la Universidad de Costa Rica y uno de 600 MHz en el Centro de Investigación en Productos Naturales (CIPRONA) de la misma universidad [22], así como un único equipo de campo bajo de 60 MHz en La Escuela de Química del Tecnológico de Costa Rica [23]. Todos ellos fabricados en el extranjero. Estos equipos se utilizan principalmente para la elucidación y caracterización estructural de moléculas orgánicas simples y complejas, así como de herramienta docente en cursos de Química Orgánica y Física. Es importante mencionar que, a lo largo de los últimos 50 años, en Costa Rica se han adquirido varios dispositivos de RMN tanto de campo bajo como de campo alto [7], lo que demuestra la importancia y necesidad de la técnica para la investigación, el desarrollo y la innovación del país.

A pesar de lo anterior, la investigación enfocada al desarrollo local de equipos de RMN de campo bajo es prácticamente inexistente. Gracias a la implementación de cursos especializados en RMN dentro de las universidades públicas nacionales, se ha logrado que estudiantes de carreras como Ingeniería Física conozcan fundamentos teóricos para el desarrollo de nuevos equipos de RMN en el país. El objetivo del presente artículo es proponer el diseño y simulación del prototipo de un equipo de RMN de bajo costo en el régimen de campo bajo, basado en un arreglo de Halbach modular de imanes permanentes para su uso en la investigación y la docencia dentro del Tecnológico de Costa Rica.

Materiales y métodos

El proceso metodológico se dividió en dos grandes fases: i. diseño, simulación y caracterización del sistema magnético y ii. modelado del comportamiento del sistema de detección y adquisición de señal.

En la primera etapa, se definió la geometría del sistema de imanes con base en un arreglo tipo Halbach. Para esto se propusieron tres diseños modulares del arreglo Halbach, posteriormente se profundizará en ellos. Para cada diseño, se consideraron dos tipos de imanes permanentes de neodimio-hierro-boro: N52 y N55 (*vide infra*), dando un total de seis configuraciones geométrico-magnéticas a evaluar. Cada configuración fue simulada utilizando el software COMSOL Multiphysics (versión 6.2), mediante un estudio estacionario de campos magnéticos. Las simulaciones permitieron determinar la magnitud y distribución espacial del campo magnético generado por cada diseño. Así mismo, se pudo verificar su homogeneidad dentro del volumen de interés de 1 mm^3, correspondiente a la región donde, teóricamente, se ubicaría la muestra durante la medición mediante la sonda de RMN [20],[21].

De manera paralela, se realizó la cotización de los materiales necesarios para cada configuración, considerando tanto el tipo como la cantidad y dimensiones de los imanes requeridos. A partir de esta información, se construyó una relación campo magnético/costo para cada diseño, permitiendo seleccionar la opción más eficiente en términos de desempeño técnico y viabilidad económica.

Una vez elegido el diseño óptimo del arreglo magnético, tomando en cuenta la homogeneidad y la intensidad de campo en teslas, se procedió al modelado del sistema de detección y adquisición de señal. Esta segunda fase se realizó en el entorno MATLAB Simulink (versión

R2024b), donde se construyó un modelo funcional del espectrómetro de RMN. También se simularon los resultados del espectro tomando en cuenta las variaciones del campo magnético para ver su efecto en el desplazamiento químico.

El sistema simulado incluye una sonda, la cual es representada como un circuito RLC serie, con parámetros de inductancia de 1 mH, resistencia de 8,16 Ω y capacitancia de 150,15 pF, sintonizado a la frecuencia de Larmor calculada para el sistema acoplado tipo XA_1. En este sistema, X representa un núcleo de carbono-13 y A un protón acoplado a este. Además, se integraron al modelo componentes electrónicos externos: un preamplificador de radiofrecuencia modelo BT00250-AlphaA RF y un amplificador de señal modelo SR560.

El espectro de respuesta se obtuvo a partir de la simulación de la excitación por un pulso de 90 grados y la posterior adquisición de la señal de inducción libre (FID, por sus siglas en inglés). Se generó tanto una señal teórica ideal como una versión experimental sintética, agregando funciones de ruido basado en la homogeneidad del campo al modelo para simular condiciones reales de adquisición. Finalmente, las señales obtenidas fueron transformadas al dominio de la frecuencia mediante una Transformada Rápida de Fourier (FFT por sus siglas en ingles) para su análisis espectral (ahorra costo computacional frente a la transformada convencional).

Arreglo de Halbach

El Arreglo de Halbach, también conocido como Matriz de Halbach, es un arreglo de imanes permanentes capaces de potenciar el campo magnético en una dirección y, al mismo tiempo, eliminar la interferencia del campo en dirección opuesta. Existen diferentes configuraciones dependiendo el tipo de uso, con una gran variabilidad de geometrías en las tres dimensiones [23]. Sin embargo, para el caso bajo estudio, es de interés la configuración cilíndrica por su fácil manufactura y diseño modular, además de que la máxima eficiencia se alcanza cuando la razón entre el radio interno r_i, y el radio externo r_0, es $r_i/r_0 \cong 0{,}451$ [21]. El esquema se presenta en la Figura 1.

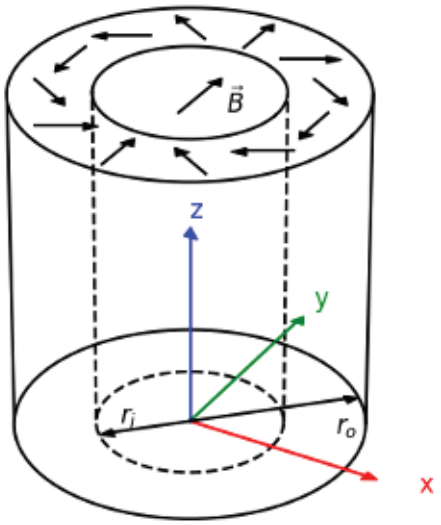


Figura 1. Arreglo de Halbach teórico, en configuración cilíndrica, vista isométrica y dirección del campo magnético generado en cada anillo, basado en [21].

Una de las aplicaciones potenciales del arreglo de Halbach cilíndrico es su uso en sistemas de RMN, gracias a su capacidad para generar campos magnéticos intensos y homogéneos en una dirección específica. Para facilitar su construcción y reducir los costos, se han propuesto

diseños modulares que emplean imanes permanentes de forma cúbica dispuestos de manera que simulan el efecto de un anillo Halbach continuo [24]. Esta aproximación permite segmentar el diseño en módulos ensamblables que replican la distribución ideal del campo, manteniendo una buena homogeneidad sin requerir componentes curvos o manufactura especializada. El diseño modular propuesto se muestra en la Figura 2.

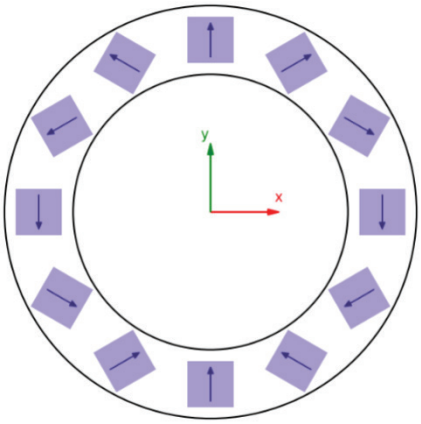


Figura 2. Sección transversal del arreglo cilíndrico de Halbach, en vista superior, con 16 imanes y su respectiva dirección del campo magnético. Adaptado de [25].

A pesar de la formación de campos magnéticos en magnitudes del orden de los militeslas, las aplicaciones de la RMN de campo bajo se han impulsado en los últimos años por la facilidad de manufactura y bajo costo [17],[18],[19],[20]. Se han logrado generar señales de RMN en dispositivos de características similares [18]. No obstante, es resaltable que para obtener mejores resultados es recomendable un proceso de prepolarización o hiperpolarización.

Simulación de imanes

Se realizó una validación numérica del campo magnético generado por un arreglo de Halbach compuesto por imanes permanentes. El objetivo fue analizar tanto la magnitud como la dirección del campo en una configuración representativa del sistema experimental. Para ello, se simuló la distribución espacial de la intensidad del campo magnético, expresada en mT, en distintos puntos dentro y alrededor del arreglo.

En cuanto a la estructura individual de cada anillo, se diseñó una disposición específica de imanes orientados estratégicamente para garantizar el comportamiento característico de un arreglo de Halbach. En cada anillo se colocaron 16 imanes permanentes de forma prismática, con caras cuadradas de 50 mm de lado, dispuestos según el patrón de orientación mostrado en la Figura 2. El diseño geométrico adoptado incluye un radio interno de r_i = 140 mm y un radio externo de r_0 = 190 mm, lo que da como resultado una razón r_i/r_0 = 0,7368. Aunque este valor no corresponde con el óptimo teórico para la máxima intensidad de campo magnético, se eligió ya que representa la mejor solución considerando las restricciones físicas del sistema, tales como el tamaño de los imanes y el espacio disponible para su disposición.

A partir de esta configuración base, se realizó una exploración paramétrica variando tanto el número total de anillos *N*, como la altura *h* de los imanes, con el propósito de optimizar la intensidad y homogeneidad del campo magnético generado en el volumen de interés. Esta configuración se observa en la Figura 3.

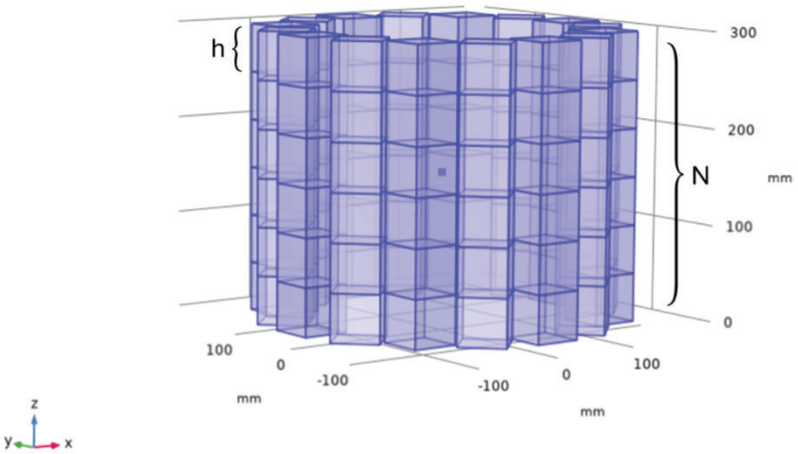


Figura 3. Diseño de anillos de imanes en arreglo de Halbach, en vista frontal con dimensiones aplicadas y punto P de mayor magnitud del campo magnético.

Para la simulación del arreglo de Halbach, se plantearon tres diseños distintos, los cuales se diferenciaron por la cantidad de anillos utilizados y la altura de los imanes que los conforman. La elección de estas configuraciones responde a criterios de simplicidad constructiva, ya que los imanes requeridos son de geometría simple y fácil manufactura. Las configuraciones consideradas fueron: (1) un único anillo conformado por imanes de 200 mm de altura; (2) un conjunto de dos anillos, cada uno con imanes de 150 mm de altura; y (3) un conjunto de seis anillos, compuestos por imanes cúbicos de 50 mm de altura.

Para cada una de las configuraciones, la evaluación de la magnitud del campo magnético se llevó a cabo en el punto central *P* del eje axial del conjunto, es decir, en el plano ubicado a una altura *H*, definida como:

$$H = \frac{N \cdot h}{2} \tag{1}$$

El punto *P* se encuentra en *r* = 0 mm, es decir, en el centro del arreglo en coordenadas cilíndricas. La elección de este punto de medición se fundamenta en que, desde el punto de vista teórico [24], allí se espera la mayor intensidad de campo magnético y es donde se ubicará la muestra a medir.

Para la evaluación de la inhomogeneidad I del campo magnético, se consideró una esfera teórica de 1 mm de radio centrada en *P*. Dentro de esta esfera, la intensidad del campo magnético se midió en siete posiciones: una en el centro y seis adicionales ubicadas a una distancia de 1 mm desde el centro a lo largo de los ejes cartesianos. Las variaciones registradas fueron analizadas mediante la ecuación (2) en donde B_{max} y B_{min} corresponden al campo magnético máximo y mínimo respectivamente, mientras que $\bar{B}$ al campo magnético promedio entre los 7 puntos [7].

$$I = \frac{B_{max} - B_{min}}{\bar{B}} \tag{2}$$

Lo que resultó en un valor de inhomogeneidad del 1,14%.

Adicionalmente, cada una de las configuraciones mencionadas fue evaluada utilizando dos tipos distintos de imanes permanentes de neodimio-hierro-boro (NdFeB): los grados N52 y N55. Estos materiales se diferencian principalmente por su densidad de flujo magnético nominal: 1,45 T para el N52 y 1,49 T para el N55, según especificaciones técnicas del fabricante [26], [27]. Esta comparación permite analizar no solo el comportamiento geométrico del arreglo, sino también el impacto del tipo de material sobre la intensidad del campo resultante, lo cual es fundamental para determinar la configuración óptima en términos de eficiencia y costo.

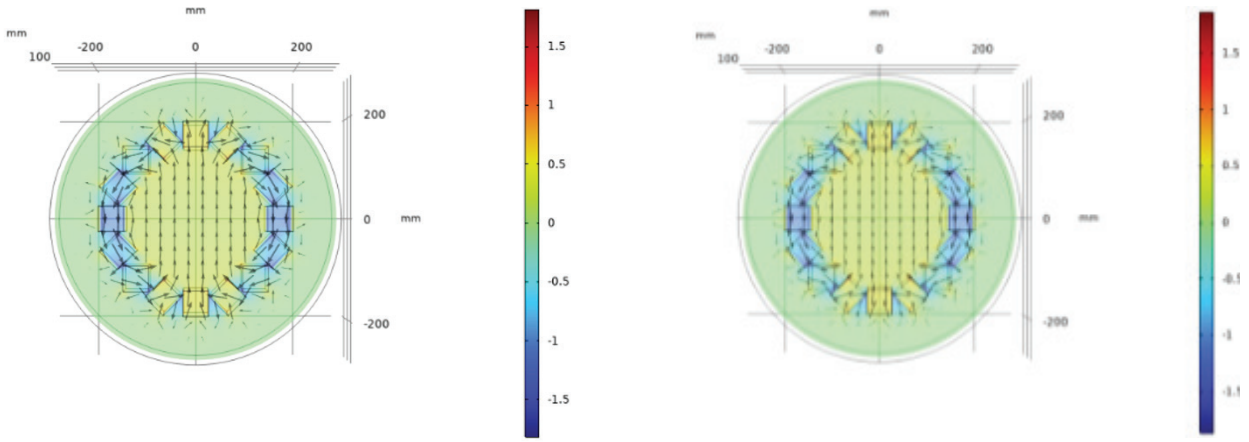
Resultados de la simulación de imanes

Los resultados obtenidos a partir de las simulaciones vectoriales del campo magnético para cada una de las configuraciones geométricas y tipos de imán se presentan en las Figuras 4, 5 y 6. En estas figuras se muestra tanto la magnitud del campo magnético, representada por la escala de colores como su dirección, indicada por flechas que muestran el sentido del vector campo magnético en cada punto.

El color amarillo en el centro del arreglo corresponde a las zonas donde el campo magnético es más intenso, cercano a los valores máximos simulados en cada configuración (entre 0,259 T y 0,306 T). A medida que se aleja del centro, los colores cambian gradualmente hacia el verde, azul claro y azul oscuro, indicando una disminución progresiva de la intensidad del campo. Este gradiente de colores permite visualizar claramente cómo el campo se concentra en la región central del arreglo de imanes.

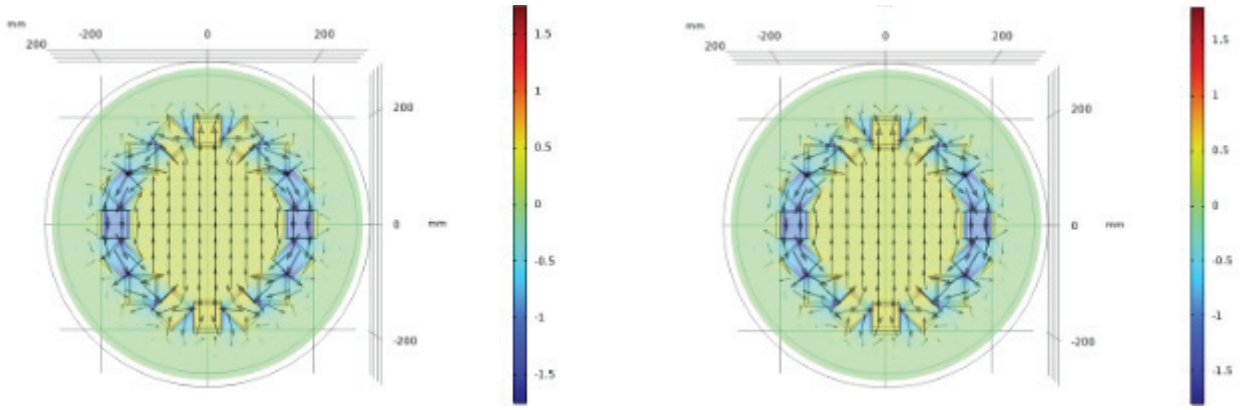
En cuanto a la dirección del campo, las flechas muestran un patrón simétrico que apunta hacia la dirección y positiva en el dispositivo, típico de un arreglo tipo Halbach. Este patrón evidencia cómo la configuración geométrica canaliza el flujo magnético hacia una sola dirección en el interior de los anillos, creando una zona central con alta uniformidad. Fuera del volumen definido por los anillos, se observa una disminución abrupta de la intensidad con colores azules, lo que confirma que el campo está confinado y que las fugas al exterior son mínimas, eliminando la necesidad de blindaje magnético adicional.

Respecto a la magnitud, los diseños correspondientes a dos y seis anillos (Figuras 5 y 6) construidos con imanes de grado N55, presentaron los valores máximos del campo, con 0,306 T y 0,305 T, respectivamente. Las versiones equivalentes con imanes N52 mostraron valores inferiores, lo cual concuerda con la mayor densidad de energía magnética asociada a los imanes N55.



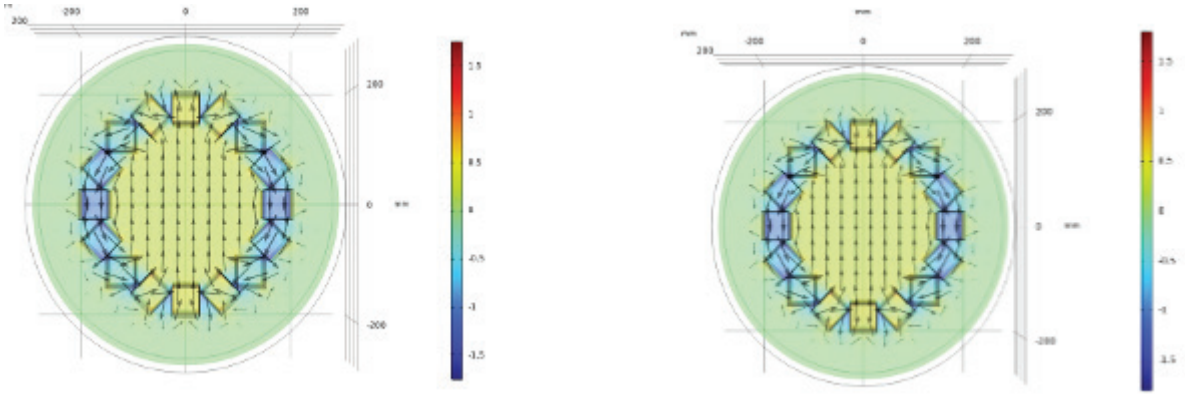
a) N52: 0,259 T b) N55: 0,266 T

Figura 4. Distribución del campo magnético simulada para un anillo compuesto por 16 imanes permanentes, utilizando el material especificado en cada caso.



a) N52: 0,298 T b) N55: 0,306 T

Figura 5. Distribución del campo magnético simulada para dos anillos compuesto por 16 imanes permanentes, utilizando el material especificado en cada caso.



a) N52: 0,297 T b) N55: 0,305 T

Figura 6. Distribución del campo magnético simulada para seis anillos compuesto por 16 imanes permanentes, utilizando el material especificado en cada caso.

Comparación teórica de los resultados obtenidos mediante la simulación

Con el fin de evaluar la viabilidad teórica de los diseños propuestos, se realiza una comparación entre la magnitud del campo magnético obtenida mediante la simulación del arreglo de Halbach compuesto por seis anillos de 16 imanes cada uno, utilizando ambos materiales (N52 y N55), y los valores reportados en la literatura para configuraciones de características similares [20],[25]. Esta comparación permite contextualizar el desempeño del sistema diseñado en relación con otros enfoques previamente estudiados. Los resultados correspondientes se resumen en la Tabla 1, donde se presenta tanto la intensidad del campo magnético (redondeado a tres cifras significativas), como las condiciones geométricas y los materiales.

Tabla 1. Comparación de los valores de intensidad del campo magnético obtenidos para el diseño simulado de seis anillos con 16 imanes permanentes por anillo y con materiales N52 y N55, en relación con los valores reportados en estudios previos con configuraciones análogas.

Magnitud del campo magnético obtenido por la simulación de arreglo Halbach de 6 anillos de 16 imanes		Magnitud del campo magnético obtenido por L. Yang [25]	Magnitud del campo magnético obtenido por Y. Peng [20]
N52	0,297 T	0,169 T	0,533 T
N55	0,305 T		

Estos resultados sugieren que, al menos desde una perspectiva teórica, el diseño propuesto tiene la capacidad de generar un campo magnético con una intensidad suficiente para realizar experimentos de RMN de campo bajo, con una buena sensibilidad y en concordancia con lo reportado en la literatura [20] y [25].

Análisis comparativo de desempeño magnético

En la Tabla 2 se resume la magnitud del campo magnético obtenido en función de cada diseño y material. Si bien el diseño de dos anillos genera un campo magnético ligeramente superior, su eficiencia económica es significativamente menor en comparación. La configuración individual de cada anillo puede ajustarse más fácilmente, lo cual habilita la posibilidad de realizar shimming (i.e. optimizar la homogeneidad del campo magnético) [25],[28].

Tabla 2. Comparación de materiales, intensidad de campo magnético simulada y costo estimado para cada uno de los diseños propuestos del arreglo Halbach.

Arreglo Halbach	Material	Campo Magnético [T]	Precio aproximado [1]
Diseño: 1 anillo de 16 imanes de 50 mm x 50 mm x 200 mm	N52	0,259	$ 3 648
	N55	0,266	$ 3 840
Diseño: 2 anillos de 16 imanes de 50 mm x 50 mm x 150 mm	N52	0,298	$ 5 344
	N55	0,306	$ 5 632
Diseño: 6 anillos de 16 imanes de 50 mm x 50 mm x 50 mm	N52	0,297	$ 4 940
	N55	0,305	$ 5 200

[1] Cotización realizada en *MagnetPeak Solutions LLC,* año 2024.

Con el objetivo de evaluar la homogeneidad del campo magnético a lo largo del eje longitudinal, la Figura 7 presenta la distribución de la magnitud del campo magnético en función de la coordenada longitudinal normalizada z según la Figura 3), donde z = 0 corresponde al centro del arreglo de imanes, z = 1 a la parte superior y z = -1 a la parte inferior.

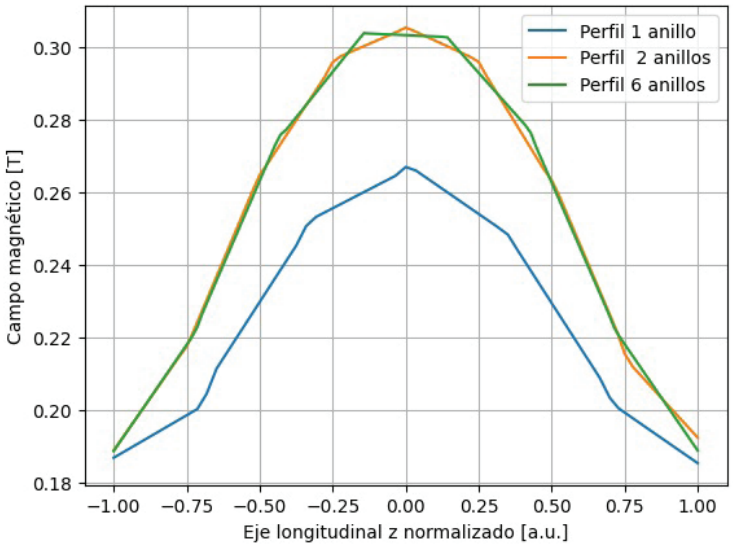


Figura 7. Comparación de la distribución longitudinal del campo magnético para los tres diseños de arreglo Halbach utilizando imanes N55.

Como se observa en la figura, en los tres diseños el máximo campo magnético se localiza en el centro del arreglo. El diseño de un solo anillo presenta el menor valor máximo de campo, mientras que el arreglo de dos anillos alcanza el mayor, seguido muy de cerca por el diseño de seis anillos, en concordancia con los resultados mostrados en la Tabla 2. No obstante, el perfil correspondiente al diseño de seis anillos exhibe un pico considerablemente más ancho, indicando que la disminución del campo magnético a lo largo del eje longitudinal ocurre de manera más gradual que en el diseño de dos anillos. En consecuencia, el arreglo de seis anillos presenta una mayor homogeneidad espacial del campo magnético, característica especialmente deseable para aplicaciones de resonancia magnética nuclear, donde la uniformidad del campo es un parámetro crítico.

Simulación del espectrómetro

La simulación del espectrómetro se diseñó con base en la arquitectura presentada en la Figura 8, la cual representa el flujo de señales y componentes principales necesarios para el funcionamiento de un sistema de espectroscopía RMN.

El sistema comienza con una fuente de poder que alimenta la unidad de procesamiento computacional, la cual se encarga de generar las señales necesarias para activar el dispositivo de control principal. El dispositivo de control regula el envío del pulso de radiofrecuencia hacia un amplificador, que aumenta la potencia de la señal antes de ser transmitida a la sonda Tx/Rx (transmisión/recepción). Esta sonda se encuentra ubicada dentro del campo magnético generado por el conjunto de imanes dispuestos en la configuración Halbach, lo que garantiza un campo homogéneo en la región de medición.

La señal de retorno inducida por los núcleos en resonancia es captada nuevamente por la misma sonda y dirigida hacia un filtro de ajuste de señal, encargado de separar las frecuencias de interés. Posteriormente, la señal es enviada a un preamplificador, que mejora su relación señal/ruido, y luego a un mezclador de señales, que la combina con una frecuencia de referencia para su posterior análisis. Finalmente, la señal procesada regresa a la unidad de procesamiento, donde se adquiere, se transforma al dominio de la frecuencia y se analiza el espectro.

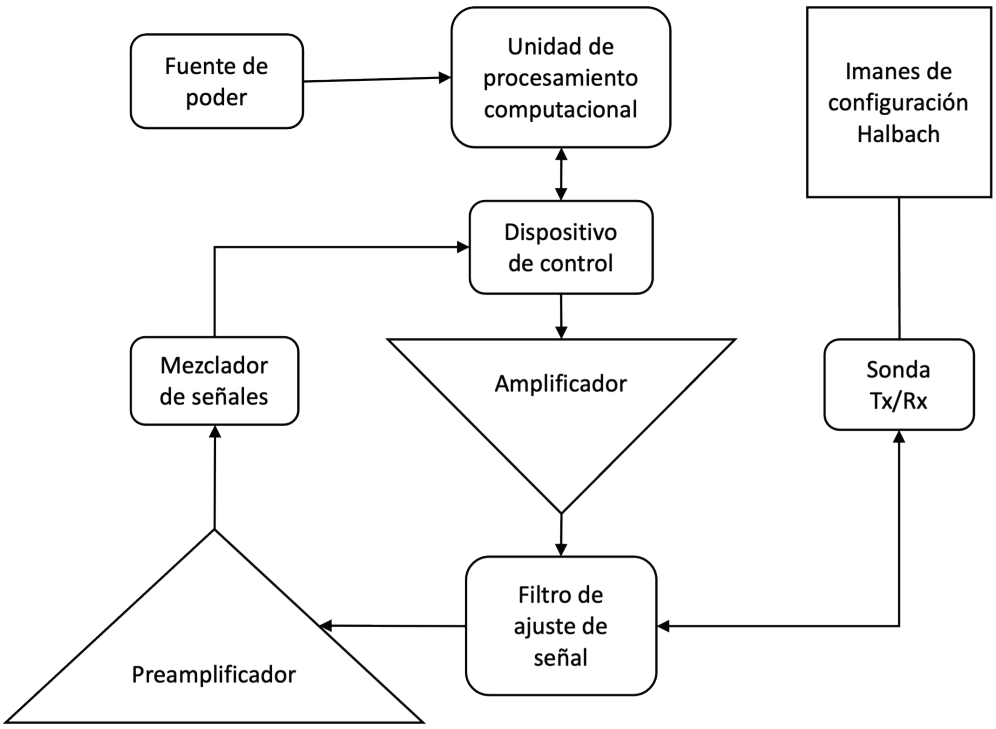


Figura 8. Diseño de arquitectura de componentes electrónicos e imanes en arreglo Halbach para el espectrómetro RMN de campo bajo.

Este modelo simulado permitió evaluar la respuesta del sistema completo ante distintas configuraciones de campo magnético y condiciones experimentales. Asimismo, hizo posible generar señales teóricas y experimentales que incluyen ruido, producto de la inhomogeneidad del campo.

El esquema del espectrómetro basado en la arquitectura de la Figura 8, se presenta en forma de diagrama de bloques en la Figura 9.

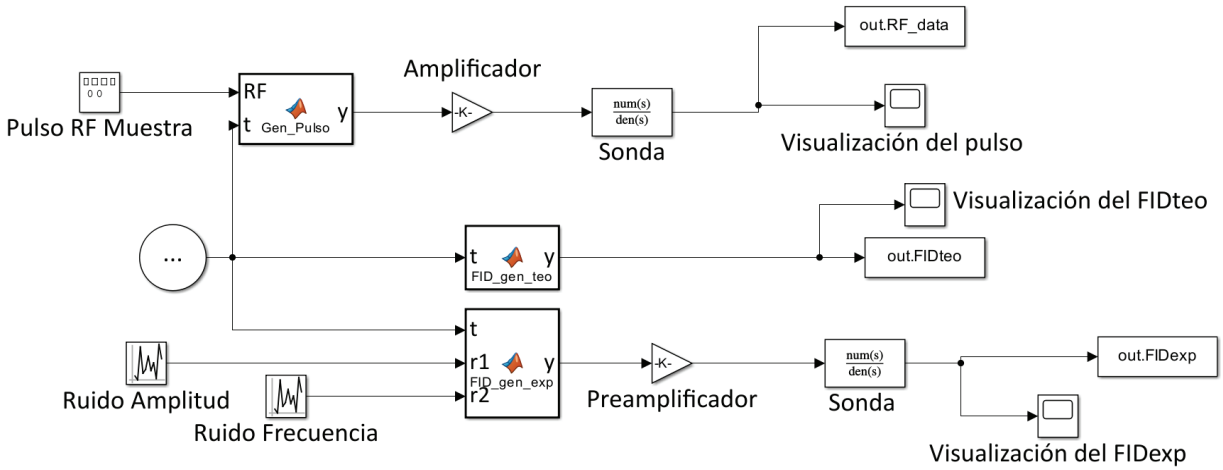


Figura 9. Esquema computacional del sistema propuesto para el espectrómetro RMN, para un pulso RF de 12,986 MHz que simula un sistema de protones del tipo XA_1.

El esquema diseñado para este experimento tiene como objetivo generar y detectar un pulso de radiofrecuencia en muestras líquidas que contienen protones del tipo XA_1, operando a una frecuencia de Larmor teórica de 12,986 MHz, lo cual lo hace adecuado para pruebas exploratorias simples, e.g. pulsos de 90° en átomos de ^{1}H o ^{19}F. Los principales resultados esperados son: (1) la caracterización temporal de la señal de pulso de radiofrecuencia (RF) emitido, en términos de su amplitud y frecuencia, y (2) la detección de la señal de FID teórica y experimental.

El sistema, presente en la figura 9, se compone de 3 bloques funcionales. En el primero, la unidad de procesamiento genera el pulso de RF, el cual se modula con una función sinusoidal para modelar su comportamiento temporal. Dicho pulso se transmite a un amplificador y, posteriormente, a través de la sonda, hasta la muestra. Respecto al segundo bloque, se utiliza una función sinusoidal de amplitud unitaria con una envolvente exponencial para generar un FID teórico, que sea característico del sistema utilizado, este valor se utiliza para la validación de los resultados. La frecuencia de *f* del pulso de RF se determina aplicando la ecuación:

$$f_{Larmor} = \gamma \cdot B_0 \tag{3}$$

donde $\gamma = \gamma_H = 42{,}577\ \mathrm{MHz/T}$ es la constante giromagnética propia del sistema XA_1 (equivalente a la del protón) y B_0 es el campo magnético externo aplicado a la sustancia. El modelo se puso a prueba aplicando la magnitud de campo magnético obtenida de 0,305 T, para el diseño de seis anillos de 16 imanes permanentes de N55 (figura 6).

En la segunda y tercera sección del esquema se agrupan los componentes relacionados con la detección de la señal producida por la relajación de los espines nucleares. Un pulso de radiofrecuencia (RF) senoidal, de amplitud unitaria y frecuencia 12,986 ± 0,048 MHz, se aplica a un bloque encargado de modular su decaimiento temporal y transformarlo en una señal de libre inducción (FID). Esta señal se ve afectada por el ruido asociado a la inhomogeneidad del campo magnético, el cual se incorpora para representar condiciones experimentales reales. En el caso del pulso teórico, el bloque genera directamente la FID simulada del sistema, mientras que para el pulso experimental la respuesta proviene de la señal medida en el montaje físico.

El pulso experimental se modeló para reproducir el comportamiento característico de una señal FID. Con este propósito, se consideraron siete puntos (*vide supra*), cada uno sometido a una ligera variación en el campo magnético local debida a la inhomogeneidad del arreglo, con el fin de analizar su efecto sobre el ensanchamiento de banda observado en el espectro obtenido. Para aproximar las condiciones de una medición real, el modelo incorpora perturbaciones aleatorias tanto en la amplitud como en la frecuencia de la señal. La amplitud se definió con un valor nominal de 1 a.u., al que se añadió una perturbación aleatoria equivalente al 1 % de dicho valor, obtenida mediante una variable con distribución uniforme en el intervalo [-1,1]. De forma similar, la frecuencia de Larmor se calculó a partir del campo magnético central obtenido en la Figura 6.b, al cual se adicionó una perturbación correspondiente al producto entre la desviación estándar del campo magnético σ_B = 0,00122 T y una nueva variable aleatoria con distribución uniforme en el intervalo [-1,1]. En consecuencia, la frecuencia de Larmor empleada en el modelo experimental se expresa como:

$$f_{Larmor_{Exp}} = \gamma \cdot \left(B_0 + \sigma_B \cdot rand(-1{,}1)\right) \tag{4}$$

donde *rand*(-1,1) representa una variable aleatoria con distribución uniforme en el intervalo [-1,1]. Se emplearon semillas fijas e independientes para las variables aleatorias de amplitud y frecuencia, con el fin de garantizar la reproducibilidad de las simulaciones y evitar correlaciones artificiales entre ambas perturbaciones.

Estas perturbaciones permiten simular las fluctuaciones e inhomogeneidades presentes en un entorno experimental, tanto por ruido como por variaciones espaciales del campo magnético, obteniendo así una señal FID más representativa de las condiciones reales de operación.

Modelado de los componentes

La sonda seleccionada para la simulación es una sonda multinuclear con las siguientes especificaciones: una inductancia de 1 µH, una resistencia de 8,16 Ω y una capacitancia de 150,15 pF. Además, se trabaja a una frecuencia teórica de 12,986 MHz, la cual corresponde a la frecuencia de Larmor del hidrógeno calculada para un campo magnético bajo, de una magnitud de 0,305 T.

Para caracterizar el comportamiento de la sonda, se modeló su respuesta mediante una función de transferencia $H(s)$. Esta función se obtuvo a partir del análisis matemático de un circuito RLC en serie, que representa el equivalente eléctrico de la sonda. La expresión resultante describe la relación entre la señal de entrada y la respuesta en frecuencia del sistema, según la siguiente ecuación:

$$H(s) = \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2\zeta\omega_0 \cdot s + \omega_0^2} \tag{5}$$

En este contexto, se calculó el coeficiente de amortiguamiento ζ, el cual indica el grado de disipación de energía en el sistema oscilatorio. Un valor de ζ = 0,05 sugiere un sistema débilmente amortiguado, lo cual es deseable en aplicaciones de RMN, ya que permite una respuesta oscilatoria suficientemente prolongada para captar el FID. Además, s corresponde a la frecuencia de salida del sistema, ω_0 es la velocidad angular la cual se calcula con la siguiente ecuación:

$$f_{Larmor} = \frac{\omega_0}{2\pi} \tag{6}$$

Sabiendo que la frecuencia de Larmor definida para este experimento fue de 12,986 MHz, se llega a un valor de ω_0 de 8,159 x 10^7 *rad*/*s*.

Por lo tanto, se tiene la siguiente función de transferencia:

$$H(s) = \frac{6{,}657 \times 10^{15}\ \frac{\text{rad}}{\text{s}}}{s^2 + s \cdot 8{,}159 \times 10^{6}\ \frac{\text{rad}}{\text{s}} + 6{,}657 \times 10^{15}\ \frac{\text{rad}}{\text{s}}} \tag{7}$$

Estos valores se aplicaron en el software dentro de los bloques correspondientes a la sonda, que experimentalmente se consideran idénticos.

Respecto al amplificador, se modeló tomando como referencia el equipo BT00250-AlphaA RF Amplifier de la marca Tomco Technologies. Este componente presenta una ganancia aproximada de 54 dB, lo cual es suficiente para amplificar el pulso y lograr una ganancia en amplitud de aproximadamente 501 veces la señal de entrada.

Para la caracterización del preamplificador se tomó como referencia el esquema SR560 Preamplifier de la marca Stanford Research Systems. Este equipo posee una ganancia plana ajustable desde 1 hasta 50000 veces, lo que equivale a una ganancia de máxima de 94 dB.

Este preamplificador es uno de los más potentes y precisos del mercado, lo que permite una recepción de pulsos altamente precisa, especialmente cuando se trabaja en el régimen de campo magnético ultra bajo.

Resultados de las simulaciones

De acuerdo con las ecuaciones de Bloch y la teoría de la excitación por radiofrecuencia descrita por Levitt [7], para la aplicación de un campo de radiofrecuencia B_1 perpendicular al campo estático B_0, se produce la precesión de la magnetización alrededor del campo RF con una frecuencia angular de nutación $\omega_1=\gamma B_1$. En consecuencia, el ángulo de rotación de la magnetización durante un pulso de duración t_p está dado por:

$$\theta = \gamma B_1 t_p \tag{8}$$

Para un pulso de excitación de 90º, el campo requerido se obtiene de:

$$B_1 = \frac{\pi}{2\gamma t_p} \tag{9}$$

Considerando un tiempo de pulso de 100 μs, se obtiene un campo de radiofrecuencia aproximado de 59 μT, valor consistente con los campos de excitación empleados en espectrómetros de RMN de campo bajo.

En la Figura 10 se presenta la respuesta temporal del pulso de radiofrecuencia simulado, obtenido a partir de una señal senoidal de entrada con amplitud unitaria (1 a.u.), después de su amplificación y propagación a través del modelo equivalente de la sonda RLC. Debido a que el modelo representa únicamente la respuesta dinámica del circuito y no calcula el campo magnético generado por la bobina, la amplitud de la señal se expresa en unidades arbitrarias. La figura muestra únicamente una décima parte de la duración total del pulso.

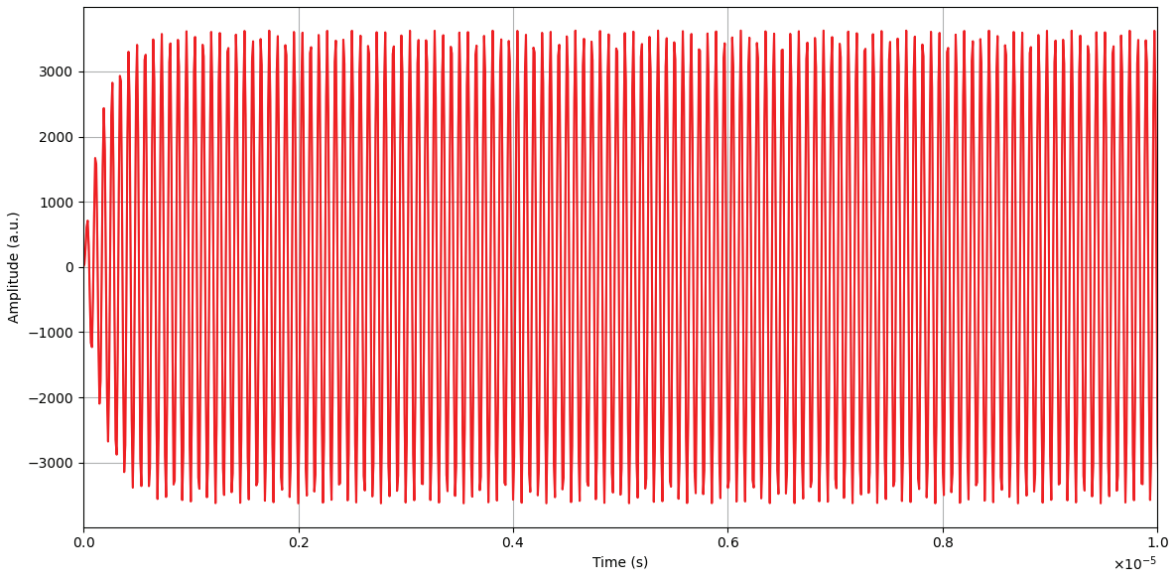
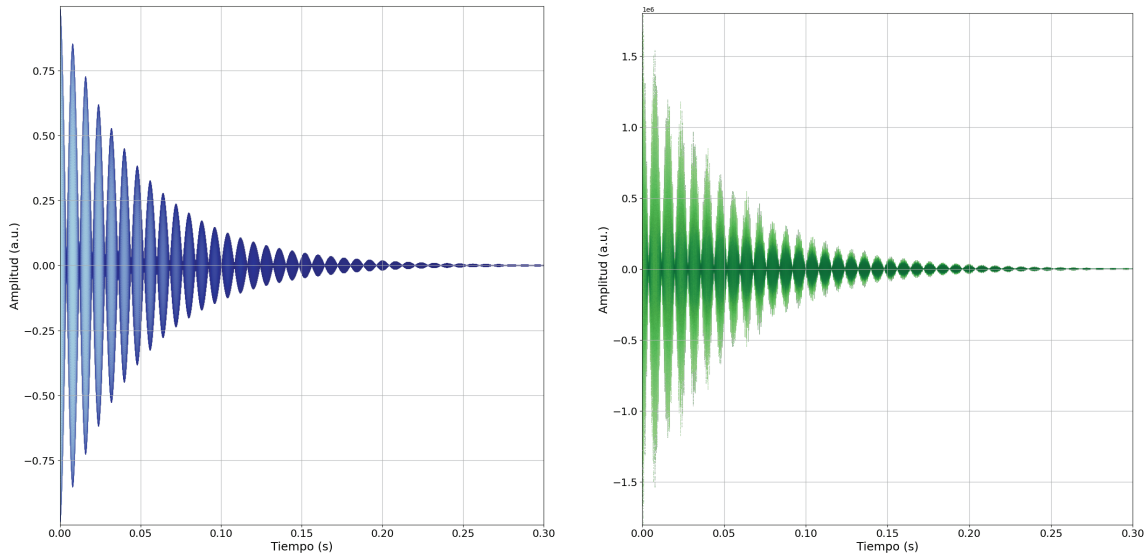


Figura 10. Simulación del pulso de emisión de RF de 12,986 MHz en escala de amplitud y tiempo.

El pulso de emisión de RF presenta una amplitud pico aproximada de 3000 a.u., correspondiente a la respuesta del circuito resonante ante la excitación aplicada. Esta respuesta evidencia una ganancia aproximada de 3 x 10^3 respecto a la señal de entrada normalizada, indicando que el circuito proporciona una amplificación significativa de la señal de excitación. En conjunto con el tiempo de pulso de 100 μs, el campo de radiofrecuencia requerido para producir una rotación de 90º, estimado mediante la ecuación (8) en aproximadamente 59 μT, resulta consistente con los valores de excitación empleados en espectrómetros de RMN de campo bajo [29], [30]. Lo anterior indica que el campo de excitación requerido puede obtenerse a partir de una señal de entrada de baja amplitud mediante una etapa de amplificación RF y una sonda resonante adecuadamente sintonizada. Asimismo, se aprecia una ligera variabilidad en la amplitud del pulso. Estas desviaciones, que aparecen en intervalos aproximadamente regulares, podrían deberse a interferencias generadas por la sonda.

En la Figura 11 se presenta la comparación entre el pulso correspondiente al FID teórico y experimental obtenido de la simulación del sistema anteriormente planteado.



FID teórico FID experimental

Figura 11. Señal correspondiente al FID teórico (a) y experimental (b) de la sustancia XA_1 con acoplamiento J.

La Figura 11a muestra el decaimiento temporal de la señal teórica generada por el sistema. Dicha señal se modeló mediante una función envolvente normalizada de magnitud unitaria, lo que facilita la visualización de la atenuación de su amplitud a lo largo del tiempo. Este modelo proporciona un punto de comparación con los resultados experimentales y permite evaluar el desempeño de los componentes simulados.

En la figura 11b se puede observar el decaimiento experimental del pulso de relajación del sistema. Se observa que la amplitud del pulso es de alrededor de 1,5 x 10^6 a.u. al inicio del tiempo de simulación. Esto se debe a que, en el contexto del RMN de campo bajo, es necesario garantizar que existe una amplitud de señal lo suficientemente grande para la correcta adquisición de los datos. Por la manera en que se simularon los componentes, es posible ajustar la ganancia de la señal si se necesitara más o menos precisión.

Además, se observa que la señal del FID experimental revela la existencia de ruido respecto a los resultados teóricos, una característica esperable debido a las particularidades del modelo planteado, el comportamiento de ambas graficas es bastante similar. A continuación, se obtuvieron las transformadas de Fourier de las señales teórica y experimental, con el fin de analizar su espectro de frecuencia. Esto se presenta en las figuras 12 y 13.

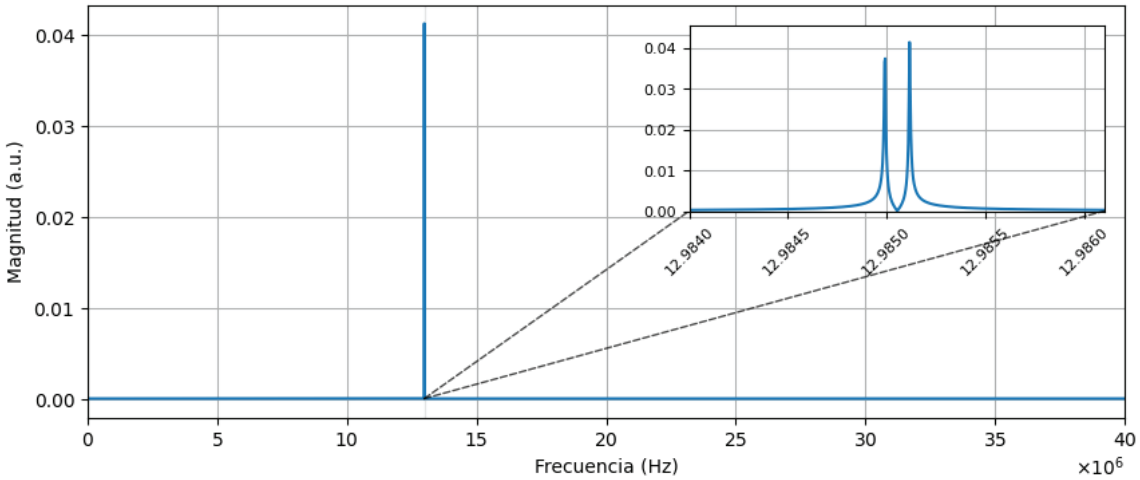


Figura 12. Espectro de frecuencia para el FID teórico, con amplificación en la escala de 12,9840 MHz y 12,9860 MHz.

Este espectro corresponde a un FID de una sustancia que posee la existencia de un protón acoplado. Cuando se escala el eje de la frecuencia de la gráfica, es posible observar la presencia de 2 picos muy cercanos a 13 MHz, esto es esperable ya que cerca de ese punto se encuentra la frecuencia de Larmor del sistema [30]. En el espectro resultante se observa la presencia de dos picos con una separación de aproximadamente 125 Hz. En la simulación se utilizó un valor de J, correspondiente al acoplamiento espín–espín típico entre un protón y un carbono-13 enlazados en un enlace σ de tipo sp^3. Este valor, fundamentado en el mecanismo de contacto de Fermi, representa una magnitud apropiada para este tipo de sistemas. Por tanto, se tiene una estructura doble claramente definida. Esta característica es coherente con el comportamiento espectral de los sistemas acoplados del tipo XA_1 [30].

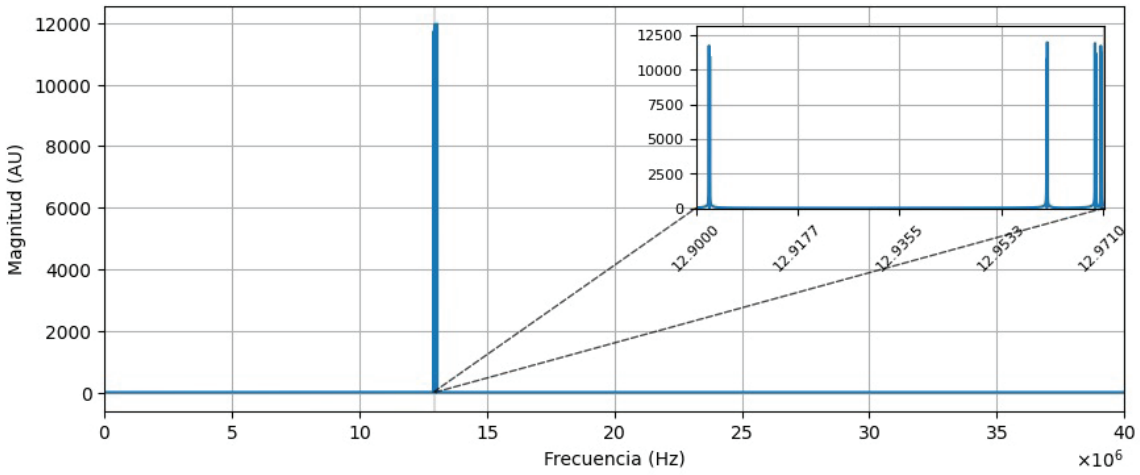


Figura 13. Espectro de frecuencia de FID teórico con perspectiva de los picos de señal y amplificación entre 12,9840 MHz y 12,9860 MHz.

En la Figura 13 se presenta una perspectiva ampliada que permite apreciar con mayor claridad el ensanchamiento de banda y el desplazamiento químico originados por la inhomogeneidad del campo en el espectro final; ya que este es la superposición de los 7 puntos simulados. En esta representación se distinguen todos los picos dobles generados, así como un ligero ensanchamiento cercano a la frecuencia de Larmor esperada.

Según la regla del acoplamiento espín-espín, un núcleo de tipo X acoplado a *n* núcleos equivalentes de tipo A genera un patrón de *n* + 1 señales en el espectro, centradas alrededor de la frecuencia de Larmor. Para el caso en estudio n =1, lo que genera una doble señal (un doblete), tal como se observa en la simulación.

La separación entre los dos picos corresponde a la constante de acoplamiento *J*,que representa la interacción entre los espines de los núcleos involucrados [30], [31]. La aparición clara de esta estructura confirma el correcto funcionamiento del sistema simulado y valida la calidad del diseño en términos de resolución espectral. Además, este resultado evidencia la capacidad del espectrómetro propuesto para captar señales características de sistemas reales, lo que respalda su uso como herramienta didáctica funcional y precisa.

Limitaciones del estudio

Los resultados obtenidos mediante COMSOL Multiphysics representan una aproximación idealizada del comportamiento del arreglo Halbach, construida a partir de la geometría seleccionada para las propiedades magnéticas nominales de los imanes y las condiciones de frontera establecidas. Por lo tanto, la intensidad de campo central máxima de 0,305 T y la inhomogeneidad calculada de 1,14 % podrían diferir de los valores obtenidos al construir y caracterizar experimentalmente el sistema, cuyo efecto real se desconoce.

La simulación supone que los imanes de grado N55 presentan propiedades magnéticas uniformes y equivalentes a los valores nominales proporcionados por el fabricante. Sin embargo, los imanes reales pueden presentar variaciones en la magnetización de cada una de las piezas planteadas. Asimismo, las tolerancias dimensionales, los pequeños errores angulares, las separaciones entre los imanes y las imprecisiones durante el ensamblaje de los seis anillos pueden alterar tanto la magnitud como la distribución espacial del campo. Debido a que la homogeneidad requerida en RMN es especialmente sensible a estas desviaciones, errores relativamente pequeños de fabricación o alineación podrían producir gradientes de campo mayores que los estimados mediante la simulación.

Los resultados presentados en el estudio también dependen de las simplificaciones numéricas utilizadas, i.e. la discretización de la geometría, la densidad de la malla, el tamaño del dominio de aire y las condiciones de frontera.

Por otra parte, el estudio estacionario no incorpora algunos fenómenos presentes durante la operación real del equipo, como las variaciones de temperatura, la desmagnetización parcial de los imanes producto del desgaste y las vibraciones mecánicas.

En cuanto a las simulaciones realizadas en MATLAB Simulink, una de las principales limitaciones corresponde a la simplificación de los componentes electrónicos del espectrómetro. La sonda se representó mediante un circuito RLC serie con parámetros constantes, mientras que el preamplificador, el amplificador de radiofrecuencia y las demás etapas de adquisición se modelaron a partir de comportamientos idealizados. En un sistema real estos componentes pueden presentar pérdidas, impedancias parásitas, variaciones de ganancia, desfases, saturación, distorsión y respuestas dependientes de la frecuencia. Por esta razón, la amplitud y la forma del pulso de 90°, de la señal FID y del espectro resultante podrían diferir de las obtenidas experimentalmente.

Asimismo, las señales analizadas fueron generadas mediante modelos teóricos y la incorporación de ruido sintético con una distribución rectangular basada en la inhomogeneidad calculada del campo magnético. Esta aproximación permite estudiar de forma preliminar la respuesta del sistema, pero no representa toda la complejidad del ruido experimental, que puede incluir ruido térmico, electrónico, ambiental y fluctuaciones del campo. El modelo también supone valores conocidos para los tiempos de relajación, la frecuencia de Larmor y el acoplamiento del sistema XA_1, sin considerar las variaciones asociadas con la composición, concentración, temperatura y geometría de una muestra real.

Conclusiones y recomendaciones

Luego de las simulaciones y estudios presentados, se considera que el diseño conformado por seis anillos con 16 imanes permanentes de grado N55, representa una alternativa con alta eficiencia relativa en términos de campo magnético por unidad de costo. Este arreglo permite alcanzar un campo magnético de 0,305 T, siendo este un valor adecuado para la operación de sistemas de RMN en condiciones de bajo campo. La configuración modular propuesta no solo facilita las labores de mantenimiento y adaptación a requerimientos específicos, sino que también contribuye a una distribución más homogénea del campo a lo largo del eje longitudinal.

Se calculó la inhomogeneidad del campo magnético para el modelo de 16 imanes permanentes, y mediante un análisis matemático se encontró un valor de 1,14%. Este resultado representa un indicador positivo para los experimentos de C-13 y F-19, lo cual se ve reforzado por las simulaciones espectrales realizadas.

Se demostró una amplitud pico de 59 µT en la sonda Tx/Rx, valor que se encuentra en concordancia con las predicciones teóricas. Esta correspondencia valida el planteamiento del esquema de modelado y confirma la fidelidad del sistema, lo que refuerza la adecuada caracterización de la sonda diseñada para su aplicación en experimentos de RMN de campo bajo.

En el estudio del FID, los componentes seleccionados para el preamplificador mostraron un desempeño importante al incrementar la señal procedente de los espines del sistema XA_1 de carbono e hidrógeno, alcanzando una amplitud de 1,5 x 10^6 a.u. Este nivel de ganancia resultó esencial para optimizar la relación señal-ruido y garantizar la integridad de la señal recuperada. El ruido introducido producto de las inhomogeneidades, no comprometió la detección de la forma de pulso esperada, pues los resultados obtenidos mediante las simulaciones de los modelos teórico y experimental mostraron tendencias similares.

Los análisis espectrales revelaron los dobletes característicos asociados al acoplamiento en el sistema XA_1, centrado en una frecuencia de Larmor de 12,986 MHz y en concordancia al campo magnético externo de 0,305 ±0,282 T. A pesar de la presencia del ensanchamiento de banda, tanto los espectros teóricos como los experimentales se ajustaron satisfactoriamente a las predicciones de la bibliografía consultada, evidenciando la capacidad del conjunto de componentes propuestos para reproducir con fidelidad las características espectrales fundamentales requeridas en la implementación práctica del espectrómetro RMN de campo bajo.

Todas las características operativas señaladas previamente y sustentadas en el modelado computacional, consolidan a la propuesta de equipo RMN de campo bajo como una solución técnicamente robusta y funcionalmente idónea para aplicaciones académicas, ofreciendo una plataforma fiable para futuros desarrollos y análisis espectrales de alta precisión. Estos

resultados abren un campo de posibilidades en el desarrollo de la RMN tanto en el país como en la región, lo que permitirá no sólo un aumento en los niveles de I+D+i sino una democratización de la técnica en el sector académico y productivo del país.

Agradecimientos

Los autores agradecen a Michael Montero Sánchez por su valiosa colaboración en la redacción inicial de este documento y por haber contribuido con ideas fundamentales que sirvieron como base para el desarrollo de esta investigación. Aunque por motivos personales tuvo que retirarse del proyecto, lo reconocemos como el quinto autor por su aporte significativo en las etapas iniciales del trabajo.

Referencias

[1] M. H. Levitt, Spin Dynamics: Basics of Nuclear Magnetic Resonance. Chichester, U.K.: Wiley, 2001.

[2] J. U. Izunobi and C. L. Higginbotham, "Polymer molecular weight analysis by ^{1}H NMR spectroscopy," Journal of Chemical Education, vol. 88, no. 8, pp. 1098–1104, 2011, doi: 10.1021/ed100461v.

[3] D. G. Lonnon and J. M. Hook, "O quantitative nuclear magnetic resonance spectroscopy of gasoline and oxygenated additives," Analytical Chemistry, vol. 75, no. 17, pp. 4659–4666, 2003, doi: 10.1021/ac034339q.

[4] N. R. Babij et al., "NMR chemical shifts of trace impurities: Industrially preferred solvents used in process and green chemistry," Organic Process Research & Development, vol. 20, no. 3, pp. 661–667, 2016, doi: 10.1021/acs.oprd.5b00417.

[5] M. Meribout and S. Sonowan, "Optimal Halbach magnet array design for portable NMR targeting multiphase flow metering applications," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 55, no. 1, pp. 1–7, Jan. 2019, Art. no. 4001207, doi: 10.1109/TMAG.2018.2877603.

[6] E. Danieli et al., "On-line monitoring of chemical reactions by using bench-top nuclear magnetic resonance spectroscopy," ChemPhysChem, vol. 15, no. 14, pp. 3060–3066, 2014, doi: 10.1002/cphc.201402049.

[7] J. A. Borloz-Chinchilla and I. F. Céspedes-Camacho, "Resonancia Magnética Nuclear en Costa Rica: una perspectiva histórica," Revista Tecnología en Marcha, vol. 37, no. 3, 2024, doi: 10.18845/tm.v37i3.6870.

[8] R. Battesti et al., "High magnetic fields for fundamental physics," Physics Reports, vols. 765–766, pp. 1–39, 2018, doi: 10.1016/j.physrep.2018.07.005.

[9] Y. Iwasa et al., "Solid-cryogen cooling technique for superconducting magnets of NMR and MRI," Physics Procedia, vol. 36, pp. 1348–1353, 2012, doi: 10.1016/j.phpro.2012.06.303.

[10] S. In, Y.-J. Hong, H.-K. Yeom, J. Ko, H. Kim, and S.-J. Park, "Thermal and structural analysis of a cryogenic conduction cooling system for a HTS NMR magnet," Progress in Superconductivity and Cryogenics, vol. 18, no. 1, pp. 59–63, 2016, doi: 10.9714/psac.2016.18.1.059.

[11] S. Ito et al., "Long term operation of superfluid-cooled cryostat for 920 MHz NMR spectrometer," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 14, no. 2, pp. 1715–1718, Jun. 2004, doi: 10.1109/TASC.2004.831051.

[12] R. de Oliveira-Silva et al., "A benchtop single-sided magnet with NMR well-logging tool specifications: Examples of application," Journal of Magnetic Resonance, vol. 322, Art. no. 106871, 2021, doi: 10.1016/j.jmr.2020.106871.

[13] T. Karasawa et al., "Homogeneous B0 coil design method for open-access ultra-low field magnetic resonance imaging: A simulation study," Magnetic Resonance Imaging, vol. 112, pp. 128–135, 2024, doi: 10.1016/j.mri.2024.07.006.

[14] K. K. G. Kurian, P. K. Madhu, and G. Rajalakshmi, "Solid-state NMR signals at zero-to-ultra-low field," Journal of Magnetic Resonance Open, vols. 10–11, Art. no. 100049, 2022, doi: 10.1016/j.jmro.2022.100049.

[15] A. B. García García, "Aplicación de técnicas de resonancia magnética nuclear al estudio de miosistemas," Ph.D. dissertation, Facultad de Veterinaria, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España, 2018. [Online]. Available: https://hdl.handle.net/20.500.14352/17022. [Accessed: Jul. 26, 2026].

[16] W. Wei et al., "Construction and testing of a high-homogeneity 55 T pulsed magnet for high-field nuclear magnetic resonance measurements," Journal of Magnetic Resonance, vol. 374, Art. no. 107862, 2025, doi: 10.1016/j.jmr.2025.107862.

[17] J. Mitchell et al., "Low-field permanent magnets for industrial process and quality control," Progress in Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy, vol. 76, pp. 1–60, 2014, doi: 10.1016/j.pnmrs.2013.09.001.

[18] N. Bryden et al., "An open-source, low-cost NMR spectrometer operating in the mT field regime," Journal of Magnetic Resonance, vol. 332, Art. no. 107076, 2021, doi: 10.1016/j.jmr.2021.107076.

[19] G. Moresi and R. Magin, "Miniature permanent magnet for table-top NMR," Concepts in Magnetic Resonance Part B: Magnetic Resonance Engineering, vol. 19B, no. 1, pp. 35–43, 2003, doi: 10.1002/cmr.b.10082.

[20] P. Yu et al., "A low-cost home-built NMR using Halbach magnet," Journal of Magnetic Resonance, vol. 294, pp. 162–168, 2018, doi: 10.1016/j.jmr.2018.07.014.

[21] P. Blümler and H. Soltner, "Practical concepts for design, construction and application of Halbach magnets in magnetic resonance," Applied Magnetic Resonance, vol. 54, pp. 1701–1739, 2023, doi: 10.1007/s00723-023-01602-2.

[22] Centro de Investigación en Productos Naturales, "Unidad de Resonancia Magnética Nuclear," Universidad de Costa Rica. [Online]. Available: https://ciprona.ucr.ac.cr/unidad-de-resonancia-magnetica-nuclear. [Accessed: Mar. 10, 2025].

[23] K. Mora-Pérez, "TEC impulsa investigación y conocimiento de la Resonancia Magnética Nuclear," Hoy en el TEC, Jan. 19, 2023. [Online]. Available: https://www.tec.ac.cr/hoyeneltec/2023/01/19/tec-impulsa-investigacion-conocimiento-resonancia-magnetica-nuclear. [Accessed: Jul. 26, 2026].

[24] K. Nishimura, "The strongest array beyond Halbach array," Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol. 580, Art. no. 170933, 2023, doi: 10.1016/j.jmmm.2023.170933.

[25] L. Yang et al., "An easy-built Halbach magnet for LF-NMR with high homogeneity using optimized target-field passive shimming method," Journal of Magnetic Resonance, vol. 357, Art. no. 107582, 2023, doi: 10.1016/j.jmr.2023.107582.

[26] Arnold Magnetic Technologies, "Sintered Neodymium-Iron-Boron Magnets: N52," datasheet. [Online]. Available: https://www.arnoldmagnetics.com/wp-content/uploads/2017/11/N52-151021.pdf. [Accessed: Jul. 26, 2026].

[27] Arnold Magnetic Technologies, "Sintered Neodymium-Iron-Boron Magnets: N55," datasheet, rev. 210802. [Online]. Available: https://www.arnoldmagnetics.com/wp-content/uploads/2017/11/N55-151021.pdf. [Accessed: Jul. 26, 2026].

[28] J. Wang, W. Mao, M. Qiu, M. B. Smith, and R. T. Constable, "Factors influencing flip angle mapping in MRI: RF pulse shape, slice-select gradients, off-resonance excitation, and B0 inhomogeneities," Magnetic Resonance in Medicine, vol. 56, no. 2, pp. 463–468, 2006, doi: 10.1002/mrm.20947.

[29] D. Holmes, "NMR basic concepts handout," Michigan State University, East Lansing, MI, USA, Feb. 2004.

[30] Q. Stern and K. Sheberstov, "Simulation of NMR spectra at zero and ultralow fields from A to Z—A tribute to Prof. Konstantin L'vovich Ivanov," Magnetic Resonance, vol. 4, pp. 87–109, 2023, doi: 10.5194/mr-4-87-2023.

[31] S. Alcicek, P. Put, D. Barskiy, V. Kontul, and S. Pustelny, "Zero-field NMR of urea: Spin-topology engineering by chemical exchange," The Journal of Physical Chemistry Letters, vol. 12, no. 43, pp. 10671–10676, 2021, doi: 10.1021/acs.jpclett.1c02768.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores declaramos haber utilizado *ChatGPT-4o* para múltiples tareas: la revisión gramatical y de estilo y el apoyo en la estructura y redacción. Todos los resultados e información asistidos por IA fueron revisados, verificados y validados minuciosamente por los autores, quienes asumen plena responsabilidad por la precisión, coherencia e integridad del contenido publicado.

Modulación de la microbiota intestinal por el aceite de orégano: interacciones entre el carvacrol y el citocromo P450

Modulation of the intestinal microbiota by oregano oil: interactions between carvacrol and cytochrome P450

Brenda García-Carillo[1], Gabriela Vanessa Sandoval-Camacho[2], Melanie Arias-Solano[3], Milena de los Ángeles Pérez-Mejía[4], Antony Aron Castillo-Meléndez[5]

Fecha de recepción: 9 de diciembre, 2025
Fecha de aprobación: 23 de abril, 2026

García-Carillo, B; Sandoval-Camacho, G.V; Arias-Solano, M; Pérez-Mejía, M; Castillo-Meléndez, A.A. Modulación de la microbiota intestinal por el aceite de orégano: interacciones entre el carvacrol y el citocromo P450. *Tecnología en Marcha*. Vol. 39 Nº 4. Octubre-Diciembre, 2026. Pág. 123-131.

https://doi.org/10.18845/tm.v39i4.8345

1 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
brgarciacarrillo@gmail.com
https://orcid.org/0009-0008-7077-709X
2 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
gabrielasvc@outlook.com
https://orcid.org/0009-0008-0916-1018
3 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
melaniearias23@gmail.com
https://orcid.org/0009-0000-4059-1202
4 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
milenapm1299@gmail.com
https://orcid.org/0009-0009-2391-2524
5 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
anthoacm@hotmail.com
https://orcid.org/0009-0007-4708-0940

Palabras clave

Antioxidante; aceites esenciales; metabolismo; CYP; inflamación; cáncer colorrectal; actividad antimicrobiana.

Resumen

El carvacrol, un compuesto fenólico del aceite de orégano, ejerce efectos beneficiosos sobre la salud a través de la modulación selectiva de la microbiota intestinal. Su acción antimicrobiana, con actividad preferente sobre patógenos, favorece el crecimiento de bacterias comensales y potencia la producción de ácidos grasos de cadena corta como el butirato. Adicionalmente, el carvacrol fortalece la barrera epitelial intestinal, induce mecanismos antioxidantes endógenos y ejerce una potente actividad antiinflamatoria. El resultado de estas acciones es una notable mejora en parámetros metabólicos, como la sensibilidad a la insulina y el perfil lipídico, y una protección frente a la inflamación crónica y la carcinogénesis colorrectal. Sin embargo, su eficacia terapéutica se ve limitada por una baja biodisponibilidad, atribuida a un metabolismo extenso por las enzimas del citocromo P450. Superar esta limitación mediante el diseño de sistemas de administración nanotecnológicos representa la frontera principal para el desarrollo de aplicaciones clínicas basadas en este prometedor nutracéutico.

Keywords

Antioxidant; essential oils; metabolism; CYP; inflammation; colorectal cancer; antimicrobial activity.

Abstract

Carvacrol, a phenolic compound found in oregano oil, exerts beneficial health effects through the selective modulation of the gut microbiota. Its antimicrobial action, which preferentially targets pathogens, promotes the growth of commensal bacteria and enhances the production of short-chain fatty acids (SCFAs) such as butyrate, an effect mediated exclusively by the microbiome. In addition, carvacrol strengthens the intestinal epithelial barrier, induces endogenous antioxidant mechanisms, and exerts potent anti-inflammatory activity. The outcome of these actions is a notable improvement in metabolic parameters, including insulin sensitivity and lipid profile, as well as protection against chronic inflammation and colorectal carcinogenesis. Nevertheless, its therapeutic efficacy is limited by low bioavailability, attributed to extensive metabolism by cytochrome P450 enzymes. Overcoming this limitation through the design of nanotechnology-based delivery systems represents a key frontier for the development of clinical applications based on this promising nutraceutical.

Introducción

El término “orégano” designa un conjunto diverso de plantas aromáticas que abarca al menos 61 especies distribuidas en 17 géneros y 6 familias botánicas, destacando las *Verbenaceae* y *Lamiaceae* por su relevancia económica [1]. Estas plantas constituyen un recurso natural de creciente interés científico debido a su compleja diversidad química y su significativo potencial terapéutico. Entre sus metabolitos secundarios más relevantes, los aceites esenciales han demostrado una notable capacidad para intervenir en procesos biológicos clave, incluyendo la modulación del microbioma, la prevención del estrés oxidativo y la regulación de respuestas inflamatorias [2].

Origanum vulgare L., especie representativa de la familia *Lamiaceae*, combina un historial etnobotánico de uso culinario y medicinal con un perfil químico complejo. Los constituyentes principales de su aceite esencial, el timol y el carvacrol, han sido ampliamente estudiados por sus propiedades antimicrobianas, antioxidantes y moduladoras de biofilm, lo que sugiere un gran potencial para el desarrollo de agentes terapéuticos y conservantes naturales [2]. El carvacrol (2-metil-5-[1-metil etil]-fenol), un monoterpenoide fenólico derivado del cimeno, destaca como el componente más activo. Evidencia reciente ha demostrado que el carvacrol ejerce un notable efecto protector frente al cáncer colorrectal asociado a colitis en modelos experimentales, donde reduce significativamente la incidencia tumoral y atenúa los signos clínicos de la enfermedad [1].

Paralelamente, se ha documentado que el carvacrol contribuye sustancialmente a la regulación del microbioma intestinal, promoviendo la proliferación de bacterias beneficiosas como *Lactobacillus* mientras limita la presencia de patógenos como *Escherichia coli, Shigella sp.* y otros [3]. Sin embargo, los mecanismos subyacentes a esta modulación microbiana trascienden la explicación simplista de su actividad antimicrobiana directa. Surge así un eje de complejidad farmacológica: el carvacrol interactúa potentemente con el sistema del citocromo P450 (CYP) del huésped. Esta interacción sugiere un mecanismo indirecto de modulación del microbioma, donde la alteración del entorno metabólico luminal resultante de la inhibición enzimática podría remodelar el ecosistema intestinal [4].

Por lo tanto, esta revisión se propone integrar críticamente el conocimiento actual sobre el aceite de orégano, con énfasis en el carvacrol, analizando de manera conjunta sus efectos directos sobre la microbiota intestinal y su interacción farmacológica con el sistema CYP. El objetivo es explicar cómo la convergencia de estos dos frentes de acción: el antimicrobiano directo y la modulación del metabolismo de la huésped, media sus aplicaciones para la salud intestinal humana, sentando las bases para su eventual desarrollo y explotación terapéutica.

Metodología

Con el fin de recolectar información necesaria para el desarrollo de esta investigación, se procedió a emplear la técnica de análisis documental clásico, o revisión bibliográfica. Esta consiste en la búsqueda, selección y sistematización de literatura en bases de datos académicas, con el objetivo de identificar la evidencia más relevante relacionada con la modulación de la microbiota intestinal por el aceite de orégano, el metabolismo del carvacrol y sus interacciones con el citocromo P450.

La búsqueda se realizó entre agosto y setiembre del 2025 en bases de datos como PubMed, Web of Science, Scopus, ScienceDirect, entre otros. Se utilizaron combinaciones de palabras clave incluyendo “carvacrol”, “aceite de orégano”, “citocromo P450”, “isoformas CYP450”, “encapsulación”, “biodisponibilidad”, “microbioma”, “compuestos fenólicos”, así como sus versiones en inglés. Estos descriptores se combinaron mediante los operadores booleanos AND y OR (por ejemplo, “carvacrol” AND “gut microbiota”, “carvacrol” AND “cytochrome P450”, “oregano essential oil” OR “carvacrol”), con el fin de ampliar o delimitar los resultados según la especificidad requerida en cada apartado temático.

Por un lado, como criterios de inclusión se seleccionaron artículos científicos originales, revisiones y reportes experimentales que abordaran los efectos del aceite de orégano sobre el microbioma intestinal, el metabolismo del carvacrol y su interacción con isoformas del CYP450 y estrategias tecnológicas orientadas a mejorar la biodisponibilidad de compuestos fenólicos.

Por otro lado, se excluyeron estudios sin acceso al texto completo, literatura no científica, artículos duplicados, trabajos previos a 2017 con el fin de garantizar la actualidad y relevancia, y aquellos que no trataran el ámbito de la salud humana, por ejemplo, investigaciones exclusivamente en plantas.

En base a esto, se seleccionaron 25 estudios. La información se organizó de forma temática en tres apartados: (i) efectos sobre la microbiota intestinal, (ii) interacciones entre el carvacrol y citocromo P450, incluyendo estrategias para mejorar su biodisponibilidad, y (iii) perspectivas a futuro.

Efectos sobre la microbiota intestinal

Un microbioma se puede definir como una comunidad microbiana que se encuentra en un hábitat delimitado y con una serie de propiedades fisicoquímicas específicas. Este incluye la microbiota, que se entiende como una serie de microorganismos de diferentes reinos presentes en el microbioma, así como su estructura, metabolitos y material genético. Además, engloba las interacciones de los microorganismos con su entorno, de forma que puede interpretarse como una serie de microecosistemas presentes en un huésped, directamente ligados a su salud y desempeño [5].

La microbiota intestinal comprende la mayoría de los microorganismos presentes en el cuerpo humano y es determinado por múltiples factores como la forma de parto, dieta, estilo de vida, medicación, genética, entre otros [6]. Esta cumple funciones que van desde la digestión hasta la regulación del metabolismo y la respuesta inmune. Nutricionalmente, se encarga de la síntesis de nutrientes y vitaminas esenciales como la vitamina K y B12. Además, realiza la fermentación de carbohidratos complejos y fibras dietéticas que dan lugar a ácidos grasos de cadena corta (AGCC), como acetato, propionato y butirato, los cuales son indispensables para la función metabólica del cuerpo y la respuesta inmune. Sumado a esto, también aporta a la respuesta y mantenimiento inmune por medio de metabolitos antiinflamatorios y a la defensa contra patógenos por medio de síntesis de compuestos antimicrobianos como los péptidos antimicrobianos (AMP) [7].

En términos de metabolismo, el microbioma tiene una gran influencia en numerosos procesos, tales como la regulación del consumo de energía, interacciones con el eje neuro-endocrino, síntesis de aminoácidos y metabolitos partícipes en los diversos ciclos metabólicos, regulación de la homeostasis de la glucosa, entre otros [8]. Por lo anterior, su integridad está directamente relacionada con el padecimiento de enfermedades metabólicas. Se ha reportado la influencia del microbioma en enfermedades como la diabetes tipo 2, obesidad, hipertensión, enfermedad hepática esteatósica asociada a disfunción metabólica (EHEMA), hipertrigliceridemia y enfermedades cardiovasculares [6], [7], [9].

El carvacrol ejerce su efecto antimicrobiano mediante la desestabilización de la integridad de la membrana citoplasmática bacteriana, siendo el grupo hidroxilo fenólico en su estructura esencial para dicha actividad [10]. Dada su naturaleza lipofílica, el carvacrol se inserta en la bicapa fosfolipídica, interrumpiendo su organización estructural y provocando cambios en la permeabilidad membranal que resultan en la fuga de contenido citoplasmático, incluyendo iones, ATP, enzimas y material genético [10].

Adicionalmente, el carvacrol induce despolarización de la membrana citoplasmática, alterando el potencial necesario para procesos energéticos esenciales y afectando la síntesis de ATP [11]. Estudios de microscopía electrónica de transmisión confirman la ruptura de pared celular, el desprendimiento de membrana citoplasmática y la dispersión del contenido intracelular en bacterias expuestas al carvacrol [10], [11].

Un aspecto relevante del carvacrol es su selectividad antimicrobiana. Aunque exhibe actividad bactericida contra patógenos como *Escherichia coli*, *Shigella sp.* y *Clostridium difficile*, simultáneamente preserva y enriquece bacterias comensales beneficiosas como *Lactobacillus*, *Bifidobacterium* y *Alistipes sp* [3]. Este comportamiento selectivo resulta en una modulación de la microbiota intestinal más que en una esterilización indiscriminada, favoreciendo un perfil microbiano asociado con la salud metabólica.

Más allá de su acción antimicrobiana, el carvacrol induce la vía Nrf2/HO-1, promoviendo la translocación nuclear de este factor de transcripción y aumentando la expresión de enzimas antioxidantes de fase II. Entre estas enzimas se encuentran la superóxido dismutasa, glutatión peroxidasa, glutatión reductasa y catalasa [12], [13]. Este mecanismo de defensa antioxidante protege al epitelio intestinal del daño oxidativo inducido por especies reactivas de oxígeno y la peroxidación lipídica, procesos frecuentemente exacerbados en condiciones de disbiosis intestinal.

Paralelamente, el carvacrol suprime la activación de la vía proinflamatoria NF-κB/TLR-4, disminuyendo la expresión de citoquinas proinflamatorias como el factor de necrosis tumoral alfa, interleucina 1 beta, interleucina 6, óxido nítrico sintasa inducible y ciclooxigenasa-2 en el epitelio intestinal [3], [14]. Simultáneamente, incrementa la expresión de la citoquina antiinflamatoria interleucina 10 [3]. Esta modulación bidireccional de la respuesta inmune contribuye al restablecimiento del balance inflamatorio en el intestino.

El carvacrol también promueve la integridad estructural de la barrera epitelial intestinal mediante el aumento en la expresión de proteínas de unión estrecha, específicamente zonula occludens-1, ocludina, claudina-1 y claudina-3 [3]. Asimismo, incrementa la expresión de mucina-2 y estimula la proliferación de células caliciformes [3]. Este efecto sobre la barrera intestinal se correlaciona estrechamente con la producción incrementada de ácidos grasos de cadena corta por el microbioma modulado, particularmente butirato, el cual regula positivamente la expresión de proteínas de barrera y sirve como sustrato energético preferencial para los colonocitos [3].

Diversos estudios en modelos murinos con microbiota intestinal humana han demostrado que el carvacrol induce cambios significativos en la estructura y composición de la microbiota intestinal [3], [15]. El tratamiento con carvacrol en modelos de colitis inducida por sulfato de dextrano sódico favoreció especialmente a bacterias productoras de ácidos grasos de cadena corta, en particular a aquellas capaces de sintetizar butirato [3], [15].

La capacidad del carvacrol para incrementar la producción de ácidos grasos de cadena corta ha sido documentada de manera consistente. En un modelo de diabetes tipo 2 inducida por dieta alta en grasas combinada con estreptozotocina, el tratamiento con carvacrol resultó en incrementos significativos en las concentraciones fecales de los seis ácidos grasos de cadena corta principales [16]. Cuando se administró simultáneamente un cóctel de antibióticos que incluía ampicilina, vancomicina, neomicina y metronidazol, estos incrementos fueron completamente abolidos, confirmando que el efecto del carvacrol es mediado por la microbiota intestinal y no representa un efecto directo del compuesto [16].

Estos metabolitos actúan sobre receptores acoplados a proteína G, GPR41 y GPR43, cuya expresión se incrementa tras la administración del compuesto [16], [17]. Dichos receptores median efectos metabólicos beneficiosos, incluyendo la regulación de la glucemia y del perfil lipídico. En modelos de diabetes tipo 2, el carvacrol redujo significativamente la glucosa en ayuno y los niveles de colesterol y triglicéridos, al tiempo que incrementó las lipoproteínas de alta densidad, efectos que dependen de la integridad del microbioma [16], [10].

Finalmente, aunque el enfoque principal del carvacrol se centra en la modulación del microbioma, también se ha observado que su acción puede extenderse a la prevención de la inflamación crónica y la carcinogénesis intestinal. En modelos de cáncer colorrectal asociado a colitis, el tratamiento redujo el número y tamaño de tumores, restauró la longitud colónica y mejoró la expresión de proteínas de barrera como ZO-1 y mucina-2 [3], [13]. Estos hallazgos sugieren que la capacidad del carvacrol para modular la microbiota intestinal no solo mejora la salud metabólica, sino que también puede ejercer efectos protectores frente a patologías intestinales más graves.

Interacciones carvacrol-CYP450

La eficacia *in vivo* del carvacrol se encuentra condicionada por su biodisponibilidad, la cual depende de su metabolismo enzimático y de la interacción con el sistema del citocromo P450 (CYP450). Este conjunto de enzimas, localizado principalmente en el hígado e intestino, constituye la principal vía de biotransformación de compuestos fenólicos, incluyendo el carvacrol, que limitan la fracción activa que alcanza la circulación sistémica y la microbiota intestinal [18], [19].

Cuando el carvacrol es ingerido, experimenta un metabolismo de primer paso; es decir, es transformado en el intestino antes de llegar a la circulación. Tras su absorción parcial en el intestino, llega al hígado donde es sometido a reacciones de fase I mediadas por el CYP450, como oxidaciones e hidroxilaciones, que originan metabolitos inestables. Posteriormente, en la fase II, dichos metabolitos se conjugan con ácido glucurónico o sulfato, lo cual favorece su eliminación por la orina [18], [20]. Esta biotransformación rápida limita el tiempo del carvacrol en circulación y restringe su potencial terapéutico.

No obstante, la interacción del carvacrol con las enzimas del citocromo P450 no se limita únicamente a su propio metabolismo, sino que también puede influir en la actividad general de este sistema enzimático. En este sentido, el carvacrol puede actuar como sustrato (siendo metabolizado y eliminado rápidamente), y también como modulador, afectando la actividad de diversas isoenzimas. Entre las más relevantes en estos procesos se encuentran la CYP2A6, CYP2E1, CYP3A4 y CYP1A2, todas implicadas en la oxidación de compuestos fenólicos y en la regulación del metabolismo de xenobióticos [18], [21].

En el caso de la CYP2E1, se ha demostrado que el carvacrol puede actuar como su inhibidor, reduciendo la formación de especies reactivas de oxígeno derivadas del metabolismo de alcohol y otras sustancias tóxicas, ejerciendo así un efecto hepatoprotector [18], [21].Otros estudios han demostrado que, en menor grado, el carvacrol, junto con otros componentes de aceites esenciales, puede interactuar con enzimas esteroidogénicas como CYP17A1 y CYP19A1, modulando rutas relacionadas con la síntesis de hormonas sexuales [22]. En un contexto clínico, se ha sugerido que esta capacidad de modulación del sistema CYP450 podría contribuir a potenciar la eficacia de ciertos tratamientos oncológicos, al disminuir la actividad de isoformas implicadas en la inactivación de fármacos, como se ha descrito en cáncer gastrointestinal [19].

Una limitación significativa para su uso terapéutico es la baja cantidad de compuesto que alcanza la microbiota intestinal en forma activa, por lo que en los últimos años se han desarrollado estrategias de encapsulación y nanoformulación que buscan superar el metabolismo acelerado mediado por el CYP450 y mejorar su absorción [22], [23]. [24], [25].

Adicionalmente, las nanoemulsiones aumentan la solubilidad en medios acuosos y facilitan la absorción intestinal [23], así como las nanopartículas de quitosano o albúmina sérica, las cuales son capaces de proteger al carvacrol de la degradación temprana y liberar el compuesto de

manera controlada [24]. Por otro lado, se han diseñado sistemas híbridos, como los invasomas y nanocompuestos basados en óxido de estaño, que incrementan la estabilidad del compuesto y permiten una acumulación selectiva en tejidos tumorales [25].

Estas técnicas han demostrado mejorar la biodisponibilidad, prolongar la vida media y potenciar las acciones biológicas del carvacrol, tanto en la modulación de la microbiota intestinal como en su efecto anticancerígeno.

Perspectivas a futuro

La investigación sobre el carvacrol debe centrarse las brechas que aún limitan su aplicación clínica, particularmente la comprensión integral de cómo interactúa simultáneamente con la microbiota intestinal [3] y con las enzimas del citocromo P450 [18], [19]. Esto implica avanzar hacia estudios más precisos y modelos experimentales que permitan esclarecer como estas dos vías convergen para modular sus efectos biológicos. Fortalecer esta base científica es esencial antes de trasladar el compuesto a aplicaciones terapéuticas más robustas.

Otra línea crucial es la caracterización precisa de las interacciones farmacocinéticas entre el carvacrol y las isoformas específicas del CYP450. Aunque se sabe que el carvacrol puede inhibir ciertas enzimas CYP [21], [22], se requiere una identificación más detallada de las isoformas humanas específicas con las que interactúa (por ejemplo: CYP3A4, CYP2C9) y la determinación de si actúa como sustrato, inhibidor o inductor. Estudios *in vitro* con microsomas hepáticos humanos y ensayos con enzimas recombinantes serán esenciales para predecir y gestionar posibles interacciones fármaco-nutracéutico cuando el carvacrol se coadministre con medicamentos de metabolismo CYP-dependiente [18], [19].

Finalmente, es imperativo trasladar los hallazgos preclínicos a ensayos clínicos rigurosos en humanos. La mayoría de la evidencia actual proviene de modelos murinos y cultivos celulares. Se necesitan estudios de intervención en humanos que evalúen la seguridad, la dosificación óptima y la eficacia del carvacrol o del aceite de orégano para modular el microbioma intestinal en poblaciones específicas, como individuos con síndrome metabólico, enfermedad inflamatoria intestinal o disbiosis [3] [19]. La integración de análisis multi-ómicos (metagenómica, metabolómica) en estos ensayos permitirá una comprensión más holística de los mecanismos de acción y los efectos sobre la fisiología del huésped.

Conclusiones

El carvacrol ejerce una modulación selectiva y beneficiosa sobre el microbioma intestinal. Su mecanismo de acción antimicrobiano, basado en la desestabilización de la membrana bacteriana, presenta selectividad hacia patógenos, preservando y enriqueciendo bacterias comensales beneficiosas como *Lactobacillus* y *Bifidobacterium*.

Los efectos beneficiosos del carvacrol se extienden más allá de la actividad antimicrobiana directa. Este compuesto fenólico fortalece la integridad de la barrera intestinal mediante la regulación positiva de proteínas de uniones estrechas y mucina-2, y ejerce potentes efectos antioxidantes (vía Nrf2/HO-1) y antiinflamatorios (supresión de la vía TLR4/NF-κB).

El carvacrol modula la composición y función del microbioma, incrementando significativamente la producción de AGCC, particularmente de butirato. Este efecto es mediado exclusivamente por el microbioma, como lo demuestra la abolición de los beneficios con el uso de antibióticos. La señalización de estos AGCC a través de los receptores GPR41/43 media importantes

mejoras metabólicas, incluyendo la reducción de la glucemia y el perfil lipídico, modulación de la inflamación, así como efectos protectores contra la carcinogénesis colorrectal asociada a colitis.

Sin embargo, la baja biodisponibilidad oral del carvacrol, resultante de su extenso metabolismo por el sistema del citocromo P450, representa una limitación significativa para su aplicación terapéutica. Las perspectivas futuras se centran en el desarrollo de sistemas de liberación nanotecnológicos y una mejor comprensión de sus interacciones farmacocinéticas para aprovechar plenamente el potencial de este nutracéutico en la promoción de la salud intestinal y sistémica.

Referencias

[1] N. Leyva-López, E. P. Gutiérrez-Grijalva, G. Vazquez-Olivo, y J. B. Heredia, "Essential Oils of Oregano: Biological Activity beyond Their Antimicrobial Properties," Molecules, vol. 22, no. 6, p. 989, Jun. 2017, DOI: https://doi.org/10.3390/molecules22060989.

[2] R. Nurzyńska-Wierdak y M. Walasek-Janusz, "Chemical composition, biological activity, and potential uses of oregano (Origanum vulgare L.) and oregano essential oil," Pharmaceuticals, vol. 18, no. 2, p. 267, 2025, DOI: https://doi.org/10.3390/ph18020267

[3] Y. Fan, Y. Chen, H. Yang, N. Chen, X. Gu, X. Feng, C. Fang, Y. Yin, H. Deng, y L. Dai, "Carvacrol attenuates mucosal barrier impairment and tumorigenesis by regulating gut microbiome," Translational Oncology, vol. 58, art. no. 102431, 2025, DOI: https://doi.org/10.1016/j.tranon.2025.102431.

[4] M. Zhao, J. Ma, M. Li, Y. Zhang, B. Jiang, X. Zhao, … y S. Qin, "Cytochrome P450 enzymes and drug metabolism in humans," International Journal of Molecular Sciences, vol. 22, no. 23, p. 12808, 2021, DOI: https://doi.org/10.3390/ijms222312808

[5] G. Berg *et al.*, "Microbiome definition re-visited: old concepts and new challenges," vol. 8, no. 1, June 2020, DOI: https://doi.org/10.1186/s40168-020-00875-0.

[6] Y. Fan and O. Pedersen, "Gut microbiota in human metabolic health and disease," vol. 19, no. 1, pp. 55–71, Jan. 2021, DOI: https://doi.org/10.1038/s41579-020-0433-9.

[7] M. T. Alsaad, M. Al-Asmakh, H. Salama, and H. S. Al-Khelaifi, "The Role of the Gut Microbiota in Health, Diet, and Disease With a Focus on Obesity," Foods, vol. 14, no. 3, p. 492, 2023, DOI: https://doi.org/10.3390/foods14030492.

[8] Cox, T.O., Lundgren, P., Nath, K. *et al.* "Metabolic control by the microbiome," Genome Medicine, vol. 14, no. 1, p. 60, Jun. 2022, DOI: https://doi.org/10.1186/s13073-022-01092-0.

[9] C. Cui, S. Gao, J. Shi, y K. Wang, «Gut-liver axis: the role of intestinal microbiota and their metabolites in the progression of metabolic dysfunction-associated steatotic liver disease», Gut Liver, vol. 19, pp. 479–507, 2025, DOI: https://doi.org/10.5009/gnl240539.

[10] N. M. Wijesundara, S. F. Lee, Z. Cheng, R. Davidson, H. P. V. Rupasinghe, "Carvacrol exhibits rapid bactericidal activity against *Streptococcus pyogenes* through cell membrane damage," *Scientific Reports*, vol. 11, art. no. 1487, 2021, DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-020-79713-0.

[11] V. Khwaza y B. A. Aderibigbe, "Antibacterial activity of selected essential oil components and their derivatives: A review," *Antibiotics*, vol. 14, no. 1, art. no. 68, 2025, DOI: https://doi.org/10.3390/antibiotics14010068.

[12] W. Mączka, M. Twardawska, M. Grabarczyk, K. Wińska, "Carvacrol—A natural phenolic compound with antimicrobial properties," *Antibiotics*, vol. 12, no. 3, art. no. 487, 2023, DOI: https://doi.org/10.3390/antibiotics12050824.

[13] S. Shah, K. P. Tryphena, G. Singh, A. Kulkarni, P. Pinjala, D. K. Khatri, "Neuroprotective role of carvacrol via Nrf2/HO-1/NLRP3 axis in rotenone-induced PD mice model," *Brain Research*, vol. 1832, art. no. 148826, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.brainres.2024.148954.

[14] M. Liu, G. Mao, X. Zhou, X. Wan, F. Zhang, L. Dai, Y. Chen, N. Dai, Y. Zhang, y Q. Du, "Carvacrol ameliorates DSS-induced intestinal inflammation in rats by suppressing the TLR4/NF-κB pathway," *Natural Product Communications*, vol. 17, no. 9, 2022, DOI: https://doi.org/10.1177/1934578X221130147.

[15] K. Zhang *et al.*, "*Bifidobacterium pseudolongum*-Derived Bile Acid from Dietary Carvacrol and Thymol Supplementation Attenuates Colitis via cGMP-PKG-mTORC1 Pathway," Advanced Science, vol. 11, no. 43, art. no. e2406917, 2024, DOI: https://doi.org/10.1002/advs.202406917.

[16] Y. Sun, H. Qu, X. Niu, T. Li, L. Wang, H. Peng "Carvacrol improves blood lipid and glucose in rats with type 2 diabetes mellitus by regulating short-chain fatty acids and the GPR41/43 pathway," *Korean Journal of Physiology and Pharmacology*, vol. 28, no. 1, pp. 49-62, 2024, DOI: https://doi.org/10.4196/kjpp.2024.28.1.1.

[17] D. Parada Venegas, M. K. De la Fuente, G. Landskron, M. J. González, R. Quera, G. Dijkstra, H. J. M. Harmsen, K. N. Faber, y M. A. Hermoso, "Short chain fatty acids (SCFAs)-mediated gut epithelial and immune regulation and its relevance for inflammatory bowel diseases," *Frontiers in Immunology*, vol. 10, art. no. 277, 2019, DOI: https://doi.org/10.3389/fimmu.2019.00277.

[18] M. Imran *et al.*, "Therapeutic application of carvacrol: A comprehensive review," *Food Science & Nutrition*, vol. 10, no. 11, pp. 3544–3561, Aug. 2022, DOI: https://doi.org/10.1002/fsn3.2994.

[19] N. Patwa *et al.*, "Targeting Gastrointestinal Cancers with Carvacrol: Mechanistic Insights and Therapeutic Potential," *Biomolecules*, vol. 15, no. 6, p. 777, May 2025, DOI: https://doi.org/10.3390/biom15060777.

[20] S. T. Krause *et al.*, "The biosynthesis of thymol, carvacrol, and thymohydroquinone in Lamiaceae proceeds via cytochrome P450s and a short-chain dehydrogenase," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 118, no. 52, Dec. 2021, DOI: https://doi.org/10.1073/pnas.2110092118.

[21] I. Khan *et al.*, "Carvacrol inhibits cytochrome P450 and protects against binge alcohol-induced liver toxicity," *Food and Chemical Toxicology*, vol. 131, p. 110582, Jun. 2019, DOI: https://doi.org/10.1016/j.fct.2019.110582.

[22] K. Sharma *et al.*, "Effect of essential oil components on the activity of steroidogenic cytochrome P450," *Biomolecules*, vol. 14, no. 2, p. 203, Feb. 2024, DOI: https://doi.org/10.3390/biom14020203.

[23] N. Preeti *et al.*, "Nanoemulsion: an emerging novel technology for improving the bioavailability of drugs," *Scientifica*, vol. 2023, pp. 1–25, Oct. 2023, DOI: https://doi.org/10.1155/2023/6640103.

[24] A. Akhlaq, M. Ashraf, M. O. Omer, and I. Altaf, "Carvacrol-Fabricated Chitosan Nanoparticle Synergistic Potential with Topoisomerase Inhibitors on Breast and Cervical Cancer Cells," *ACS Omega*, vol. 8, no. 35, pp. 31826–31838, Aug. 2023, DOI: https://doi.org/10.1021/acsomega.3c03337.

[25] A. Gamal *et al.*, "Synthesis of Carvacrol-Loaded Invasomes Nanoparticles Improved Acaricide Efficacy, Cuticle Invasion and Inhibition of Acetylcholinestrase against Hard Ticks," *Microorganisms*, vol. 11, no. 3, p. 733, Mar. 2023, DOI: https://doi.org/10.3390/microorganisms11030733.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores declaramos haber utilizado *ChatGPT* para la reorganización bibliográfica. Todos los resultados e información asistidos por IA fueron revisados, verificados y validados minuciosamente por los autores, quienes asumen plena responsabilidad por la precisión, coherencia e integridad del contenido publicado.

Activación epigenética del gen SERPINA3 como estrategia compensatoria para la deficiencia de alfa-1 antitripsina: propuesta de un modelo con CRISPRa

Epigenetic activation of the SERPINA3 gene as a compensatory strategy for alpha-1 antitrypsin deficiency: proposal of a model with CRISPRa

Maciel Andrea Alfaro-Ulate[1], Luis Alfredo Barboza-Fallas[2], Sylvanna Samira Dodero-Ramírez[3], Ronald Steven Quesada-Monge[4], Josué David Rojas-Rojas[5], Laura Viviana Sanabria-Rodríguez[6]

Fecha de recepción: 1 de diciembre, 2025
Fecha de aprobación: 16 de abril, 2026

Alfaro-Ulate, M.A; Barboza-Fallas, L.A; Dodero-Ramírez, S.S; Quesada-Monge, R.S; Rojas-Rojas, J.D; Sanabria-Rodríguez, L.V. Activación epigenética del gen SERPINA3 como estrategia compensatoria para la deficiencia de alfa-1 antitripsina: propuesta de un modelo con CRISPRa. *Tecnología en Marcha*. Vol. 39 Nº 4. Octubre-Diciembre, 2026. Pág. 132-142.

https://doi.org/10.18845/tm.v39i4.8348

1 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
macalfaro@estudiantec.cr
https://orcid.org/0009-0001-7404-3615
2 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
lubarboza@itcr.ac.cr
https://orcid.org/0000-0003-1669-3764
3 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
sdodero@estudiantec.cr
https://orcid.org/0009-0002-0463-1574
4 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
ronquesada@estudiantec.cr
https://orcid.org/0009-0003-6033-5996
5 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
j.rojas.10@estudiantec.cr
https://orcid.org/0009-0000-0782-2486
6 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
lasanabria@estudiantec.cr
https://orcid.org/0009-0004-2614-3111

Palabras clave

Sobrexpresión; *SERPINA3*; AATD; hepatocitos; antiproteasa; hígado.

Resumen

La deficiencia de alfa-1 antitripsina (AATD) es una enfermedad genética asociada principalmente con mutaciones en *SERPINA1*, que ocasionan acumulación de proteína mal plegada en el hígado y menor protección antiproteasa pulmonar. Este artículo revisa los avances recientes en terapias génicas para la AATD y propone un modelo alternativo basado en la activación epigenética de *SERPINA3* mediante CRISPRa. La estrategia utilizaría ARNm de dCas9-VP64 o dCas9-p300core y sgRNA dirigidos al promotor de *SERPINA3*, administrados mediante nanopartículas lipídicas funcionalizadas con GalNAc. La propuesta se evaluaría inicialmente en hepatocitos derivados de células iPSC y posteriormente en modelos murinos con hígado humanizado. Se analizarían la expresión génica, la secreción de alfa-1-antiquimotripsina, la actividad antiproteasa, la viabilidad celular y los posibles efectos fuera del objetivo. El modelo busca determinar si la activación controlada de *SERPINA3* puede compensar parcialmente el desequilibrio entre proteasas y antiproteasas característico de la AATD sin modificar directamente la secuencia del ADN.

Keywords

Overexpression; *SERPINA3*; AATD; hepatocytes; antiprotease; liver.

Abstract

Alpha-1 antitrypsin deficiency (AATD) is an inherited disorder mainly associated with pathogenic variants in *SERPINA1*, which cause misfolded protein accumulation in the liver and reduced pulmonary antiprotease protection. This article reviews recent advances in gene therapies for AATD and proposes an alternative model based on epigenetic activation of *SERPINA3* using CRISPRa. The strategy would use mRNA encoding dCas9-VP64 or dCas9-p300core and sgRNAs targeting the *SERPINA3* promoter, delivered through GalNAc-functionalized lipid nanoparticles. The approach would be evaluated initially in hepatocytes derived from induced pluripotent stem cells and subsequently in humanized liver mouse models. Gene expression, alpha-1 antichymotrypsin secretion, antiprotease activity, cell viability, and potential off-target effects would be assessed. The model seeks to determine whether controlled *SERPINA3* activation can partially compensate for the protease-antiprotease imbalance associated with AATD without directly modifying the DNA sequence, thereby providing a potentially reversible compensatory strategy for further preclinical investigation and validation in relevant experimental systems.

Introducción

La deficiencia de alfa-1 antitripsina (AATD) es causada por mutaciones en el gen *SERPINA1*, encargado de codificar la proteína alfa-1 antitripsina (A1AT), cuya función principal es proteger el tejido pulmonar mediante la inhibición de la elastasa de los neutrófilos. Dependiendo de la variante, los niveles de A1AT en la sangre pueden disminuir o la proteína puede plegarse de forma anómala, lo que provoca dos problemas principales: la destrucción del tejido pulmonar y la acumulación de polímeros en el hígado, que pueden conducir al desarrollo de enfisema y daño hepático, respectivamente [1], [2].

En el ámbito clínico, la AATD se asocia con enfisema de inicio temprano, bronquiectasias y, en los casos más graves, cirrosis y carcinoma hepatocelular. Los síntomas suelen aparecer entre los 20 y 50 años, y el tabaquismo acelera significativamente la progresión de la enfermedad [2]. Aunque se considera una enfermedad rara, su prevalencia global se estima entre 1 de cada 2000 y 6000 individuos, con mayor frecuencia en poblaciones de ascendencia europea. Además, gran parte de los pacientes permanece sin diagnóstico, lo que refleja un subreconocimiento clínico importante [2], [3].

Actualmente, los tratamientos disponibles incluyen broncodilatadores, glucocorticoides, terapia de aumento con A1AT purificada y, en casos avanzados, trasplante de hígado. Sin embargo, estos abordajes no eliminan la causa genética de la enfermedad. La terapia de aumento requiere infusiones regulares y costosas, mientras que el trasplante depende de la disponibilidad de órganos y conlleva riesgos elevados [3], [4]. En los últimos años, se han explorado nuevas estrategias, como el silenciamiento del transcrito de la variante Z de *SERPINA1* mediante siRNA, que ha mostrado mejoras en parámetros clínicos e histológicos, aunque todavía no representa una cura definitiva [5], [6].

Frente a las limitaciones de los tratamientos actuales, se han investigado estrategias de edición genética dirigidas a corregir variantes patogénicas de *SERPINA1* en los hepatocitos. Entre ellas, la edición de bases administrada mediante nanopartículas lipídicas ha conseguido corregir la variante PiZ en modelos preclínicos, aumentar la concentración sérica de A1AT y mejorar la histología hepática [7]. También se ha demostrado la corrección de esta variante en hepatocitos derivados de células madre pluripotentes inducidas (iPSC) de pacientes con AATD, con una reducción en la acumulación de la proteína mal plegada y una recuperación de su secreción [8]. Sin embargo, todavía persisten desafíos relacionados con la eficiencia y estabilidad de la edición, los efectos fuera del objetivo, la inmunogenicidad y la administración eficiente de los componentes terapéuticos [7], [9]. Por ello, resulta pertinente explorar estrategias alternativas que regulen la expresión génica sin modificar directamente la secuencia del ADN.

En este contexto, el presente trabajo revisa los avances y las limitaciones de las terapias génicas desarrolladas para la AATD y propone un modelo conceptual basado en la activación epigenética de *SERPINA3* mediante CRISPRa. Este sistema utiliza una Cas9 catalíticamente inactiva unida a dominios activadores para incrementar la transcripción de genes endógenos sin producir cortes en el ADN [10]. Debido a que *SERPINA3* codifica una antiproteasa secretada principalmente por el hígado, se propone evaluar si el aumento controlado de su expresión puede contribuir a compensar parcialmente el desequilibrio entre proteasas y antiproteasas asociado con la enfermedad [11]. De esta manera, el trabajo plantea una estrategia de compensación funcional como una posible alternativa para ampliar las opciones terapéuticas dirigidas a la AATD.

Para sustentar la revisión, se realizó una búsqueda bibliográfica entre el 19 de agosto y el 28 de noviembre de 2025 mediante Google Scholar, SciELO, ResearchGate, el Repositorio Institucional de la UNAM y la Red de Bibliotecas de ODUCAL. Se utilizaron términos relacionados con la deficiencia de alfa-1 antitripsina, *SERPINA1*, *SERPINA3*, CRISPRa, edición génica y nanopartículas lipídicas. Se priorizaron publicaciones en español e inglés correspondientes al periodo 2020–2025, aunque también se incluyeron fuentes anteriores por su relevancia para explicar aspectos fundamentales de la enfermedad. La selección se realizó mediante la revisión de títulos, resúmenes y textos completos, y se excluyeron documentos duplicados o sin relación directa con el objetivo del trabajo.

Bases genéticas y moleculares de la AATD

La deficiencia de alfa-1-antitripsina se ha vinculado a mutaciones del gen *SERPINA1*, el cual es uno de los inhibidores de la proteasa en el suero [12]. Se relacionan más de 500 mutaciones diferentes para el *locus SERPINA1*, las deficiencias con mayor frecuencia en la deficiencia son Z (Glu342Lys) y el S relacionado con el alelo (Glu264Val), el tipo silvestre del alelo se denomina M [13].

Mutación en alelo Z

Este alelo presenta una mutación p.Glu342Lys, lo cual es un reemplazo de un residuo de glútamico por uno de lisina en la región clave de la estructura de la *SERPINs* que ha sido demostrado experimentalmente que altera las propiedades de la AAT [14].

Esta mutación genera la síntesis de monómeros inestables dejando abiertos el *breach* y el *shutter*, lo cual predispone al alelo Z a dimerizarse. Esto puede ocurrir por tres mecanismos distintos: mediante el intercambio del extremo C-terminal, en el que la AAT donadora presenta una auto-inserción del RCL junto con un plegamiento anormal de la región C-terminal que se inserta en la siguiente molécula de AAT; mediante la reorganización *loop-sheet*, donde el RCL ocupa el *shutter* de otra molécula de AAT; o mediante la configuración de horquilla β, cuando el RCL, junto con una β-hebra contigua, forma una estructura tipo horquilla β que se inserta en el núcleo de una molécula receptora de AAT [13]

Esta variante de deficiencia grave es la más común del gen alfa-1-antitripsina, la frecuencia de portadores es 1 en 27 personas en el norte de Europa, 1 en 83 en Estados Unidos, 1 en 75 personas de ascendencia europea en Australia, 1 en 46 personas de ascendencia europea en Nueva Zelanda; no se ha observado en China, Japón, Corea, Malasia ni en el norte y oeste de África [15].

Mutación en alelo S

La mutación del alelo S corresponde a la variante p.Glu264Val, que consiste en la sustitución de un residuo de ácido glutámico por valina. Esta alteración reduce la estabilidad de la alfa-1 antitripsina (AAT), favorece su plegamiento anómalo parcial y disminuye su secreción desde el hígado hacia la circulación [12], [15]. El alelo S es una de las variantes deficientes más frecuentes y presenta una distribución relacionada principalmente con la ascendencia europea. Su frecuencia de portadores es de aproximadamente 1 de cada 5 personas en el sur de Europa, 1 de cada 30 en Estados Unidos, 1 de cada 23 personas de ascendencia europea en Australia y 1 de cada 26 en Nueva Zelanda. En contraste, es poco frecuente o prácticamente inexistente en poblaciones de Asia, África y entre poblaciones aborígenes australianas [15].

En la deficiencia de alfa-1 antitripsina (AATD), la mutación Z (Glu342Lys) provoca una polimerización de la proteína y su acumulación dentro de los hepatocitos [16]. Este proceso reduce de forma significativa la cantidad de AAT que se libera a la circulación y limita la disponibilidad de la proteína en el pulmón para inhibir la elastasa de neutrófilos [16].

Diversos estudios han mostrado que los individuos homocigotos Pi*ZZ presentan concentraciones más elevadas de polímeros de AAT en plasma, dichos niveles se asocian tanto con un peor rendimiento en pruebas de función pulmonar, como con un incremento de la rigidez hepática [17], [18]. Esto sugiere que la alteración no es solamente cuantitativa, sino también cualitativa, ya que la proteína que circula puede encontrarse en formas menos eficaces [17], [19].

La función de la AAT se ve aún más comprometida por su vulnerabilidad a la oxidación. Un mecanismo clave es la inactivación del residuo de metionina en su sitio activo, el cual es particularmente sensible al daño oxidativo en contextos como el tabaquismo, lo que anula su capacidad para unirse a la elastasa [17].

La consecuencia directa de este desequilibrio entre proteasas y antiproteasas es la degradación de fibras elásticas y matriz extracelular en el parénquima pulmonar. A nivel clínico, este mecanismo se manifiesta como enfisema panacinar, con predominio en lóbulos inferiores, acompañado de atrapamiento aéreo y disminución progresiva de la función respiratoria [20], [21].

Por último, aunque se ha utilizado históricamente el umbral sérico de 11 µM como referencia para un nivel protector de AAT, investigaciones recientes señalan que este valor debe interpretarse con cautela y en conjunto con la situación clínica de cada paciente [6]. Esto subraya que las terapias actuales no siempre garantizan una protección efectiva y refuerza la necesidad de alternativas más estables y duraderas [22], [1].

Análisis Comparativo con otras enfermedades monogénicas tratadas con CRISPR

Los avances recientes en edición génica con CRISPR-Cas9 han demostrado su potencial terapéutico en humanos para diversas enfermedades monogénicas, sentando un precedente crucial para el desarrollo de una terapia para la Deficiencia de Alfa-1 Antitripsina (AATD). Los éxitos en modelos de aplicación *ex vivo* e *in vivo* proporcionan un marco de referencia para la corrección del gen *SERPINA*1.

Enfermedades Hepáticas: Edición In Vivo en Amiloidosis por ATTR

El ensayo clínico de NTLA-2001 demostró que una única administración intravenosa del sistema *CRISPR* empaquetado en nanopartículas lipídicas (LNP) es suficiente para inducir una disminución profunda y duradera de los niveles de transtiretina en el suero de los pacientes [23]. Este estudio constituye la primera evidencia de edición génica *in vivo* eficaz en hepatocitos humanos. El paralelismo con la AATD es directo, ya que el hígado es también el órgano diana, respaldando la idea de que un enfoque similar podría restaurar la secreción de AAT funcional a la circulación.

Enfermedades oftálmicas y metabólicas: Lecciones de LCA10 y PCSK9

Para la amaurosis congénita de Leber (LCA10), el estudio EDIT-101 empleó vectores de AAV para administrar los componentes de *CRISPR* directamente en el espacio subretiniano. Los resultados mostraron un perfil de seguridad manejable y señales preliminares de mejora en la función visual en un subconjunto de pacientes tratados [24]. Por otro lado, en modelos preclínicos de hipercolesterolemia familiar, la edición de bases o *base editing* del gen PCSK9 en el hígado de primates no humanos, administrada mediante LNP, logró una reducción duradera del colesterol LDL [25]. La lección para AATD es que la edición *in vivo* es viable en humanos y primates, y que tecnologías de alta precisión como la edición de bases son candidatas ideales para corregir la mutación puntual E342K en el gen *SERPINA*1.

Estado actual de la investigación

Un estudio reciente documenta que se emplearon en ensayos preclínicos vectores AAV o adenovirus con *SERPINA1*, observándose restauración parcial de AAT sérica y reducción de los síntomas pulmonares/hepáticos en modelos animales, pero sin evidencia firme de mantenimiento prolongado en humanos [9].

Además, la inmunogenicidad al capsídeo viral y respuestas adquiridas (anticuerpos, activación de linfocitos T) han sido reportadas como causas de fallo en la expresión persistente o al impedir re-administraciones del vector [26].

Por otro lado, los desafíos de lograr una expresión segura incluyen variabilidad en la dosis requerida, riesgo de toxicidad hepática en pacientes PiZZ debido al estrés por acumulación de PiZ, y la necesidad de que la expresión sea lo suficientemente alta para proteger los pulmones con menor incidencia de posibles efectos adversos [9].

En los últimos años, ha habido adelantos notables con edición génica basada en *CRISPR*, especialmente mediante *base editors* y *prime editors*. Por ejemplo, un estudio de 2022 demostró que el uso de *base editors*, entregados con nanopartículas lipídicas, corrigió la mutación PiZ en ratones transgénicos, aumentando la AAT sérica y mejorando la histología hepática [7]. Otro trabajo en 2025 usó un *adenine base editor* compacto empaquetado en un AAV, que logró aproximadamente un 23 % de edición sobre el gen mutante en hígado murino, reduciendo el daño hepático asociado [27].

El sistema de administración hacia el órgano diana continúa siendo uno de los principales desafíos. Las nanopartículas lipídicas han permitido administrar editores genéticos al hígado y corregir la variante PiZ de *SERPINA1* en modelos preclínicos [7]. Asimismo, la funcionalización de estas nanopartículas con ligandos GalNAc ha demostrado favorecer la entrega hepática de componentes de edición genética en modelos animales [26], [28]. Sin embargo, su aplicación para transportar sistemas dirigidos específicamente a la corrección o regulación de *SERPINA1* y *SERPINA3* todavía requiere validación adicional.

En cuanto a los modelos celulares *ex vivo*, se ha demostrado que los editores de adenina pueden corregir la variante Z en hepatocitos derivados de células madre pluripotentes inducidas de pacientes con AATD. Esta corrección redujo la acumulación de la proteína mal plegada y restauró parcialmente la secreción de AAT, sin que se detectaran modificaciones fuera del objetivo mediante los métodos de secuenciación utilizados en el estudio [28].

A pesar de estos avances, todavía persisten desafíos relacionados con la eficiencia de la edición *in vivo* y su estabilidad a largo plazo [9], [27]. Los editores de bases también pueden producir modificaciones fuera del objetivo o cambios no deseados en bases cercanas al sitio seleccionado [28]. Por otra parte, la respuesta inmunitaria frente a los componentes de edición o sus vehículos de administración puede limitar la persistencia del tratamiento y dificultar su readministración, especialmente cuando se utilizan vectores virales [9], [26]. Estos riesgos deben evaluarse mediante estudios preclínicos específicos antes de considerar su aplicación clínica.

Finalmente, a la fecha considerada en esta revisión, no se dispone de evidencia clínica publicada y revisada por pares que demuestre la corrección de la AATD mediante CRISPR. Los estudios publicados comprenden la edición de *SERPINA1* en modelos murinos mediante nanopartículas lipídicas [7] y vectores AAV [27], así como su evaluación en hepatocitos derivados de células iPSC de pacientes con AATD [28]. Por tanto, la evidencia disponible continúa siendo principalmente preclínica.

Potenciales implicaciones clínicas

El enfisema es una enfermedad que se caracteriza por la formación de espacios aéreos distales al bronquiolo terminal debido a la destrucción de las paredes alveolares, debido a que la elastasa degrada fibras elásticas y colágeno en los alvéolos [29]. Otra de las enfermedades desarrolladas es la hepatopatía, que lleva a una incapacidad de digerir los alimentos, almacenar energía y eliminar toxinas, debido a que el genotipo ZZ tiene un mal plegamiento de

la proteína AAT que precipita en agregados de polímeros en el hígado. Ambas manifestaciones se relacionan en cuanto a la concentración plasmática de ATT, 80mg/dl-120 mg/dl [30], y el enfisema suele darse de 30mg/dl-40mg/dl y, también, se puede manifestar debido a alelos nulos, siendo el riesgo más alto, sin embargo, la hepatopatía suele expresarse en las etapas iniciales de la vida y se le asocia al genotipo dominante [31],[32].

La terapia de reemplazo enzimático (TRE) se basa en la administración periódica, vía intravenosa, de una enzima exógena biológicamente activa obtenida tradicionalmente a partir del plasma humano purificado. Sin embargo, actualmente se busca desarrollar proteínas recombinantes como alternativa de producción, con el objetivo de disponer de una fuente más accesible, segura y eficiente de la enzima necesaria para la terapia [33]. Esta enzima es absorbida en las células y reemplaza la que está defectuosa, permitiendo la degradación de los sustratos acumulados, lo que provoca que el equilibrio de las proteasas sea restaurado, reduciendo la degradación de tejido [28][34]. La sustancia infundida ha demostrado mantener su actividad enzimática en plasma y en lavado broncoalveolar. Como la vida media de la AAT infundida es de 4–5 días, las primeras pautas de administración ensayadas tuvieron una periodicidad semanal de 60 mg/kg/semana; sin embargo, si se aplica una concentración menor, puede generar periodos menores de protección tisular [31][34].

Asimismo, se buscan alternativas debido a que los costos pueden llegar ser realmente elevados, además, si no es compatible se podrían presentar efectos adversos. Una de las alternativas que han dado resultados es la INBRX-101, lo cual requiere una dosis cada 3 semanas, igualmente el estudio menciona que es bien tolerado y que aumentó la actividad anti-elastasa, lo cual indica un descenso en la degradación del tejido pulmonar [35].

Propuesta de Terapia Epigenética con CRISPRa para la Deficiencia de Alfa-1 Antitripsina (AATD)

Se propone un análisis comparativo sobre técnicas de terapia epigenética, esperando la respuesta compensatoria del gen *SERPINA3*, las cuales se basan en el sistema CRISPRa, evaluando dCas9-VP64 frente a dCas9-p300core, las cuales deben presentar disparidad de resultados según la inducción de SERPINA3, la secreción de proteína y la ausencia de toxicidad, previamente al estudio in vivo.

El objetivo consiste en inducir en los hepatocitos una sobreexpresión controlada de *SERPINA3*, gen que codifica la alfa-1-antiquimotripsina, una antiproteasa, producida principalmente por el hígado y con actividad inhibitoria sobre serinproteasas como la catepsina G, la quimotripsina y la quimasa [11]. A partir de estas propiedades, se propone evaluar si el aumento de su expresión puede contribuir a compensar parcialmente el desequilibrio entre proteasas y antiproteasas asociado con la AATD. Esta compensación constituye una hipótesis del modelo y todavía debe demostrarse experimentalmente.

El sistema CRISPRa utiliza una nucleasa Cas9 catalíticamente inactiva, denominada dCas9, fusionada a dominios activadores transcripcionales. Mediante sgRNA complementarios a secuencias reguladoras específicas, el complejo se dirige hacia la región promotora de *SERPINA3* y estimula su transcripción sin cortar ni modificar directamente la secuencia del ADN [10]. Se compararán dos configuraciones de los activadores, que difieren entre sí por su fusión: una está relacionada con el activador VP64, el cual recluta la maquinaria trancripcional, y la otra con su contraparte unida al dominio catalítico de la acetiltransferasa, creando la dCas9-VP64 y la dCas9-p300core, respectivamente [36].

Para su administración en hepatocitos, se propone utilizar LNP funcionalizadas con ligandos GalNAc, debido a que estos ligandos favorecen la captación hepática mediante su reconocimiento por el receptor de asialoglicoproteína presente en los hepatocitos [8], [25]. Este sistema permitiría una expresión transitoria de los componentes de CRISPRa; sin embargo, su eficiencia, seguridad, duración y posibilidad de readministración deberán evaluarse experimentalmente.

El diseño partirá del sitio de inicio de la transcripción (TSS) predominante de *SERPINA3* en hepatocitos humanos, verificado con anotaciones GENCODE y datos de expresión o cromatina accesible. Para cada activador se diseñarán de tres a cinco sgRNA independientes que cubran la ventana promotora de -400 a -50 pb respecto al TSS para activadores transcripcionales como se considera dCas9-VPR, o la vecindad de -100 a +100 pb para dCas9-p300core. Se conservarán guías adyacentes a motivos NGG, con puntuación alta de actividad y sin sitios alternativos con menos de tres desajustes en la región semilla. Se excluirán guías que solapen variantes frecuentes o regiones repetitivas. Las guías se evaluarán individualmente y en combinaciones de dos o tres; se elegirá la combinación que maximice la inducción de SERPINA3 con el menor cambio transcriptómico fuera del objetivo [37][38].

Los grupos control deberán permitir atribuir el efecto a cada componente: células sin tratamiento; LNP vacías; LNP sin GalNAc con la misma carga de RNA; LNP-GalNAc con sgRNA no dirigido; LNP-GalNAc con dCas9 sin dominio activador más sgRNA contra *SERPINA3*; y LNP-GalNAc con dCas9-activador más sgRNA no dirigido. Un control positivo de inducción de un gen hepático validado para CRISPRa puede confirmar que un resultado negativo no proviene de la plataforma. Los controles de vehículo deben igualar composición lipídica, dosis total de RNA y número de administraciones.

En modelos *in vitro* de hepatocitos derivados de células iPSC, preferiblemente con pacientes con genotipo PiZZ y una línea sana para denominar un control, la eficacia se evaluaría mediante el incremento en la expresión de *SERPINA3*, cuantificada por RT-qPCR y Western blot [39], junto con ensayos funcionales para determinar su actividad antiproteasa.

En hepatocitos derivados de al menos tres líneas iPSC independientes, se realizará una matriz exploratoria de 0.1, 0.3 y 1.0 microgramos por mililitro de RNA total encapsulado, con tres réplicas biológicas por condición. La relación entre mRNA del activador y sgRNA se mantendrá constante. El MOI no aplica porque la plataforma propuesta usa LNP no virales. La captación y expresión se medirán a 24, 48, 72 y 96 horas, y la persistencia a 7 días tras una dosis única. El criterio de avance será una inducción reproducible de SERPINA3 y proteína secretada frente a todos los controles, sin pérdida relevante de viabilidad ni respuesta inflamatoria.

En modelos murinos con hígados humanizados se analizarían las concentraciones séricas de SERPINA3 y los posibles cambios histológicos en el hígado y el pulmón, además de evaluar la presencia de respuestas hepáticas o inflamatorias adversas. La evaluación pulmonar tendrá de carácter exploratorio y de seguridad, debido a que este modelo no permite verificar la seguridad pulmonar. Debido a que CRISPRa regula la transcripción sin producir cortes en el ADN, esta estrategia reduciría el riesgo de mutaciones asociadas con la ruptura de la doble cadena; sin embargo, todavía deberán evaluarse sus posibles efectos transcripcionales y epigenéticos fuera del objetivo [10].

Para farmacodinámica inicial se utilizarán ratones con hígado humanizado, puesto que los ARN guía (sgRNA) se diseñan contra el promotor humano de *SERPINA3*. Tras una administración intravenosa única de LNP-GalNAc, se explorarán 0.1, 0.3 y 1.0 mg por kg de mRNA encapsulado, con muestreo a 24 h, 72 h, día 7 y día 14. Se compararán dosis-respuesta, distribución hepática, SERPINA3 humano en hígado y suero, ALT, AST, histopatología, citoquinas y expresión fuera del

objetivo. Un estudio de redosificación se considerará solo después de demostrar reversibilidad y ausencia de respuesta inmunitaria limitante. Este modelo evalúa entrega y activación hepática; por sí solo no demuestra protección pulmonar.

Los resultados se interpretarán por la influencia de SERPINA3 mediante su actividad inhibitoria al momento de quimotripsina, catepsina G y quimasa. El ensayo se basa en estas pruebas, igualmente se puede incluir una complementaria como el estudio de elastasa de neutrófilos para comprobar la compensación funcional directa, debido a que el aumento en biomarcador puede ser una prueba rápida para el análisis, sin embargo, no estaria directamente influenciada en el resultado principal sobre el modelo del AATD.

Esta estrategia podría aplicarse como terapia compensatoria o adyuvante en pacientes con genotipos PiZZ o PiSZ, especialmente en fases tempranas, ofreciendo una alternativa no mutagénica para restaurar el equilibrio proteasa-antiproteasa. Además, el modelo abre la posibilidad de explorar la activación dirigida de otros genes con funciones protectoras endógenas, consolidando una línea de investigación emergente en terapias génicas de regulación epigenética.

Conclusiones

El análisis de la evidencia disponible indica que la activación génica mediante CRISPRa representa una alternativa terapéutica potencialmente viable para el tratamiento de la deficiencia de alfa-1 antitripsina (AATD). Este enfoque busca intervenir sobre el desequilibrio molecular de la enfermedad, originado principalmente por la variante Z del gen *SERPINA1*, que genera una proteína defectuosa asociada con acumulación hepática y pérdida de la protección pulmonar. En este contexto, la activación de *SERPINA3* mediante CRISPRa constituye una hipótesis terapéutica preclínica cuya factibilidad deberá demostrarse mediante la evaluación de la especificidad de la activación, la secreción de proteína funcional, la actividad antiproteasa y la seguridad de la plataforma de administración.

Los estudios preclínicos revisados muestran que la corrección de *SERPINA1* en hepatocitos mediante editores de bases incrementa la secreción de AAT funcional y mejora la histología hepática. Estos resultados constituyen un antecedente relevante para el desarrollo de nuevas estrategias de intervención genética dirigidas al hígado y respaldan la exploración de CRISPRa, aunque su aplicación para activar *SERPINA3* en el contexto de la AATD todavía requiere validación experimental.

Asimismo, los avances clínicos en otras patologías monogénicas tratadas con tecnologías CRISPR, como la amiloidosis por ATTR, respaldan la seguridad y eficacia potencial de estas herramientas y fortalecen el fundamento científico para explorar su aplicación en la AATD. No obstante, aún se requiere establecer indicadores estandarizados que relacionen los cambios moleculares obtenidos con una mejoría funcional objetiva, incluida la restauración de la actividad antielastasa y la reducción del daño hepático y pulmonar.

A pesar de estos avances, la revisión también pone en evidencia una brecha científica significativa. A la fecha considerada, no se conocen ensayos clínicos en humanos que hayan demostrado la corrección de *SERPINA1* mediante CRISPR con resultados clínicos verificables. Además, persisten desafíos relacionados con la eficiencia y estabilidad de la intervención *in vivo*, la inmunogenicidad asociada con los sistemas de administración, los posibles efectos fuera del objetivo y la necesidad de plataformas de entrega más precisas, redosificables y dirigidas al hígado.

En este marco, el valor del presente trabajo se encuentra en la propuesta de una línea de investigación que integra el conocimiento actual de la fisiopatología de la AATD con los avances recientes en biotecnología génica y epigenética. La activación del gen *SERPINA3* mediante CRISPRa se presenta como un modelo conceptual de estrategia terapéutica compensatoria y potencialmente reversible. La posibilidad de inducir la expresión de una antiproteasa endógena abre nuevas perspectivas para el desarrollo de intervenciones personalizadas y complementarias a las terapias actualmente disponibles.

Referencias

[1] G. Ávalos-Navarro, R. Ramírez-Patiño, L. F. Jave-Suárez, and E. Reyes-Uribe, "La proteína alfa-1 antitripsina y su papel en la fisiopatología del cáncer," *Biotecnia*, vol. 26, Art. no. e2287, 2024, doi: 10.18633/biotecnia.v26.2287.

[2] M. Meseeha, A. Sankari, and M. Attia, "Alpha-1 antitrypsin deficiency," in *StatPearls*. Treasure Island, FL, USA: StatPearls Publishing, 2024. [Online]. Available: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK442030/.

[3] National Heart, Lung, and Blood Institute, "Deficiencia de alfa-1 antitripsina," 2024. [Online]. Available: https://www.nhlbi.nih.gov/es/salud/deficiencia-de-alfa-1-antitripsina. Accessed: Sep. 29, 2025.

[4] R. A. Wise, "Deficiencia de alfa1-antitripsina," *Manual MSD, versión para profesionales*, 2024. [Online]. Available: https://www.msdmanuals.com/es/professional/trastornos-pulmonares/enfermedad-pulmonar-obstructiva-cr%C3%B3nica-y-trastornos-relacionados/deficiencia-de-alfa1-antitripsina . Accessed: Sep. 29, 2025.

[5] P. Strnad *et al.*, "Fazirsiran for liver disease associated with alpha1-antitrypsin deficiency," *The New England Journal of Medicine*, vol. 387, no. 6, pp. 514–524, 2022, doi: 10.1056/NEJMoa2205416.

[6] K. Remih, S. Amzou, and P. Strnad, "Alpha1-antitrypsin deficiency: New therapies on the horizon," *Current Opinion in Pharmacology*, vol. 59, pp. 149–156, 2021, doi: 10.1016/j.coph.2021.06.001.

[7] M. S. Packer *et al.*, "Evaluation of cytosine base editing and adenine base editing as a potential treatment for alpha-1 antitrypsin deficiency," *Molecular Therapy*, vol. 30, no. 4, pp. 1396–1406, 2022, doi: 10.1016/j.ymthe.2022.01.040.

[8] R. B. Werder *et al.*, "Adenine base editing reduces misfolded protein accumulation and toxicity in alpha-1 antitrypsin-deficient patient iPSC-hepatocytes," *Molecular Therapy*, vol. 29, no. 11, pp. 3219–3229, 2021, doi: 10.1016/j.ymthe.2021.06.021.

[9] R. Lorincz and D. T. Curiel, "Advances in alpha-1 antitrypsin gene therapy," *American Journal of Respiratory Cell and Molecular Biology*, vol. 63, no. 5, pp. 560–570, 2020, doi: 10.1165/rcmb.2020-0159PS.

[10] E. Becirovic, "Maybe you can turn me on: CRISPRa-based strategies for therapeutic applications," *Cellular and Molecular Life Sciences*, vol. 79, no. 2, Art. no. 130, 2022, doi: 10.1007/s00018-022-04175-8.

[11] M. de Mezer *et al.*, "SERPINA3: Stimulator or inhibitor of pathological changes," *Biomedicines*, vol. 11, no. 1, Art. no. 156, 2023, doi: 10.3390/biomedicines11010156.

[12] S. Seixas and P. I. Marques, "Known mutations at the cause of alpha-1 antitrypsin deficiency: An updated overview of the *SERPINA1* variation spectrum," *The Application of Clinical Genetics*, vol. 14, pp. 173–194, 2021, doi: 10.2147/TACG.S257511.

[13] F. Dasí, "Alpha-1 antitrypsin deficiency," *Medicina Clínica (English Edition)*, vol. 162, no. 7, pp. 336–342, 2024, doi: 10.1016/j.medcle.2023.10.026.

[14] R. Falfán-Valencia, I. Silva-Zolezzi, G. Pérez-Rubio, Á. Camarena, F. Morales-Mandujano, M. Montaño, and A. Ramírez-Venegas, "Bases genéticas y moleculares de alfa-1 antitripsina (*SERPINA1*) y su papel en la EPOC," *Revista del Instituto Nacional de Enfermedades Respiratorias de México*, vol. 22, no. 2, pp. 124–136, 2009.

[15] P. Strnad, N. G. McElvaney, and D. A. Lomas, "Alpha1-antitrypsin deficiency," *The New England Journal of Medicine*, vol. 382, no. 15, pp. 1443–1455, 2020, doi: 10.1056/NEJMra1910234.

[16] S. Tumpara *et al.*, "Polymerization of misfolded Z alpha-1 antitrypsin protein lowers CX3CR1 expression in human PBMCs," *eLife*, vol. 10, Art. no. e64881, 2021, doi: 10.7554/eLife.64881.

[17] A. Núñez *et al.*, "Association between circulating alpha-1 antitrypsin polymers and lung and liver disease," *Respiratory Research*, vol. 22, no. 1, Art. no. 244, 2021, doi: 10.1186/s12931-021-01842-5.

[18] G. Menga *et al.*, "Normativas de diagnóstico y tratamiento del déficit de alfa-1 antitripsina," *Revista Americana de Medicina Respiratoria*, vol. 14, no. 1, pp. 28–46, 2014. [Online]. Available: https://www.scielo.org.ar/pdf/ramer/v14n1/v14n1a06.pdf.

[19] C. Mazzuca *et al.*, "Immunological and homeostatic pathways of alpha-1 antitrypsin," *Frontiers in Immunology*, vol. 15, Art. no. 1443297, 2024, doi: 10.3389/fimmu.2024.1443297.

[20] D. Toumpanakis *et al.*, "Small airways disease in patients with alpha-1 antitrypsin deficiency," *Respiratory Medicine*, vol. 213, Art. no. 107248, 2023, doi: 10.1016/j.rmed.2023.107248.

[21] M. E. O'Brien *et al.*, "A review of alpha-1 antitrypsin binding partners for activity and function," *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 23, no. 6, Art. no. 3140, 2022, doi: 10.3390/ijms23063140.

[22] A. N. Franciosi *et al.*, "Alpha-1 antitrypsin deficiency: Clarifying the role of the putative protective threshold," *European Respiratory Journal*, vol. 59, no. 2, Art. no. 2101410, 2022, doi: 10.1183/13993003.01410-2021.

[23] J. D. Gillmore *et al.*, "CRISPR-Cas9 in vivo gene editing for transthyretin amyloidosis," *The New England Journal of Medicine*, vol. 385, no. 6, pp. 493–502, 2021, doi: 10.1056/NEJMoa2107454

[24] E. A. Pierce *et al.*, "Gene editing for CEP290-associated retinal degeneration," *The New England Journal of Medicine*, vol. 390, no. 4, pp. 341–353, 2024, doi: 10.1056/NEJMoa2309915

[25] T. Rothgangl *et al.*, "In vivo adenine base editing of *PCSK9* in macaques reduces LDL cholesterol levels," *Nature Biotechnology*, vol. 39, no. 8, pp. 949–957, 2021, doi: 10.1038/s41587-021-00933-4.

[26] A. Meliani *et al.*, "Antigen-selective modulation of AAV immunogenicity with tolerogenic rapamycin nanoparticles enables successful vector re-administration," *Nature Communications*, vol. 9, no. 1, Art. no. 4098, 2018, doi: 10.1038/s41467-018-06621-3.

[27] J. Gao *et al.*, "A compact base editor rescues AATD-associated liver and lung disease in mouse models," *Molecular Therapy*, vol. 33, no. 11, pp. 5817–5828, 2025, doi: 10.1016/j.ymthe.2025.08.040.

[28] L. N. Kasiewicz *et al.*, "GalNAc-lipid nanoparticles enable non-LDLR dependent hepatic delivery of a CRISPR base editing therapy," *Nature Communications*, vol. 14, no. 1, Art. no. 2776, 2023, doi: 10.1038/s41467-023-37465-1.

[29] A. O. Carrasco Moctezuma, "Caracterización clínica, bioquímica y genética de individuos con deficiencia de alfa-1 antitripsina: relación de los valores de la función pulmonar y enfisema evaluado por tomografía de alta resolución en pacientes del Instituto Nacional de Enfermedades Respiratorias del 2010 a 2020," specialty thesis in pulmonology, Universidad Nacional Autónoma de México, Mexico City, Mexico, 2020. [Online]. Available: https://repositorio.unam.mx/contenidos/3622281.

[30] R. Reinoso-Arija *et al.*, "Resultados de la implementación de un programa de detección de casos de déficit de alfa-1 antitripsina en pacientes con EPOC," *Open Respiratory Archives*, vol. 5, no. 3, Art. no. 100251, 2023, doi: 10.1016/j.opresp.2023.100251.

[31] R. Vidal, I. Blanco, F. Casas, R. Jardí, and M. Miravitlles, "Diagnóstico y tratamiento del déficit de alfa-1-antitripsina," *Archivos de Bronconeumología*, vol. 42, no. 12, pp. 645–659, 2006, doi: 10.1157/13095974.

[32] R. Cortes-Lopez and I. Barjaktarevic, "Alpha-1 antitrypsin deficiency: A rare disease?," *Current Allergy and Asthma Reports*, vol. 20, no. 9, Art. no. 51, 2020, doi: 10.1007/s11882-020-00942-4.

[33] S. N. Triviño Clavijo, "Estrategias para la optimización de la producción de proteínas recombinantes terapéuticas en *Pichia pastoris* modificadas genéticamente: revisión de literatura," thesis, Dept. Microbiology, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia, 2020. [Online]. Available: http://hdl.handle.net/10554/50034

[34] P. H. Feitosa, "Diagnosis and augmentation therapy for alpha-1 antitrypsin deficiency: Current knowledge and future potential," *Drugs in Context*, vol. 12, Art. no. 2023-3-1, 2023, doi: 10.7573/dic.2023-3-1.

[35] M. L. Brantly *et al.*, "Recombinant alpha-1 antitrypsin–Fc fusion protein INBRX-101 in adults with alpha-1 antitrypsin deficiency: A phase 1 study," *Chronic Obstructive Pulmonary Diseases: Journal of the COPD Foundation*, vol. 11, no. 3, pp. 282–292, 2024, doi: 10.15326/jcopdf.2023.0469.

[36] K. Omachi y J. H. Miner, «Comparative analysis of dCas9-VP64 variants and multiplexed guide RNAs mediating CRISPR activation», PLoS ONE, vol. 17, n.o 6, p. e0270008, jun. 2022, doi: 10.1371/journal.pone.0270008.

[37] M. A. Horlbeck et al., «Compact and highly active next-generation libraries for CRISPR-mediated gene repression and activation», eLife, vol. 5, sep. 2016, doi: 10.7554/elife.19760.

[38] I. B. Hilton et al., «Epigenome editing by a CRISPR-Cas9-based acetyltransferase activates genes from promoters and enhancers», Nature Biotechnology, vol. 33, n.o 5, pp. 510-517, abr. 2015, doi: 10.1038/nbt.3199.

[39] R. Sule, G. Rivera, and A. V. Gomes, "Western blotting (immunoblotting): History, theory, uses, protocol and problems," *BioTechniques*, vol. 75, no. 3, pp. 99–114, 2023, doi: 10.2144/btn-2022-0034.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores declaramos haber utilizado *ChatGPT* para múltiples tareas: el apoyo en la estructura y redacción y la traducción de textos. Todos los resultados e información asistidos por IA fueron revisados, verificados y validados minuciosamente por los autores, quienes asumen plena responsabilidad por la precisión, coherencia e integridad del contenido publicado.

Caracterización multianalítica de suelos de Liberia (Guanacaste) para su uso potencial como material constructivo

Multianalytical characterization of soils from Liberia (Guanacaste) for their potential use as a construction material

Merylin Seas-Jiménez[1], Adrián Quesada-Martínez[2], Dominique Chang-Albizurez[3]

Fecha de recepción: 9 de diciembre, 2025
Fecha de aprobación: 17 de abril, 2026

Seas-Jiménez, M; Quesada-Martínez, A; Chang-Albizurez, D. Caracterización multianalítica de suelos de Liberia (Guanacaste) para su uso potencial como material constructivo. *Tecnología en Marcha*. Vol. 39 Nº 4. Octubre-Diciembre, 2026. Pág. 143-159.

https://doi.org/10.18845/tm.v39i4.8381

1 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
mer.seasj@gmail.com
https://orcid.org/0009-0008-7924-971X
2 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
adquesada@itcr.ac.cr
https://orcid.org/0000-0002-5975-4195
3 Escuela de Arquitectura y Urbanismo. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
dchang@itcr.ac.cr
https://orcid.org/0000-0002-9813-2006

Palabras clave

Medición; Suelo; Temperatura; Mineral; Material.

Resumen

Este estudio presenta una caracterización multianalítica de suelos de la región de Liberia, Guanacaste, con el fin de evaluar su idoneidad como material de construcción en sistemas de cerramiento tradicionales. Se emplearon tres técnicas complementarias: fluorescencia de rayos X (XRF), difracción de rayos X (XRD) y calorimetría diferencial de barrido (DSC), con el objetivo de conocer la composición química, mineralógica y el comportamiento térmico del material. Los resultados obtenidos evidencian que las tierras de Liberia están compuestas principalmente por dióxido de silicio (SiO_2), así como cantidades intermedias de Al_2O_3 y Fe_2O_3, lo cual es característico de los suelos volcánicos y está en línea con los materiales que se han utilizado para la construcción con tierra a lo largo de la historia. Se confirmó la presencia de fases feldespáticas altamente cristalinas y cuarzo, indicando estructuras estables, no expansivas y resistentes a los ciclos de humedad-sequedad, así como valores de calor específico necesarios para simulaciones higrotérmicas. La caracterización, muestra que estos suelos tienen propiedades térmicas, mineralógicas y químicas adecuadas para su empleo constructivo, resaltando sus posibilidades como material estable, sostenible y de valor cultural en el marco arquitectónico de Liberia.

Keywords

Measurement; Soil; Temperature; Mineral; Material.

Abstract

This study presents a multianalytical characterization of soils from the region of Liberia, Guanacaste, with the aim of assessing their suitability as a construction material for traditional earthen wall systems. Three complementary techniques were employed X-ray fluorescence (XRF), X-ray diffraction (XRD), and differential scanning calorimetry (DSC)to determine the chemical composition, mineralogical phases, and thermal behavior of the material. The results show that the soils from Liberia are primarily composed of silicon dioxide (SiO_2), along with intermediate proportions of Al_2O_3 and Fe_2O_3, a composition typical of volcanic soils and consistent with materials historically used in earthen construction. The presence of highly crystalline feldspathic phases and quartz was confirmed, indicating stable, non-expansive structures resistant to moisture–drying cycles, as well as specific heat capacity values required for hygrothermal simulations. Overall, the characterization demonstrates that these soils possess suitable thermal, mineralogical, and chemical properties for constructive use, highlighting their potential as a sustainable and technically viable material within traditional architectural systems.

Introducción

La tierra ha sido históricamente uno de los materiales más empleados en la construcción, destacando por su disponibilidad, bajo costo y sostenibilidad ambiental. En zonas como Guanacaste, Costa Rica, este recurso sigue siendo importante no solo por su fuerte arraigo en los sistemas de construcción tradicionales, sino también por el potencial de adaptarse a los estándares actuales sostenibilidad de la ingeniería y la arquitectura.

A pesar de este valor histórico y constructivo, en Costa Rica los sistemas en tierra han sido tradicionalmente percibidos como técnicas poco confiables o asociadas a edificaciones de baja calidad. Esta visión responde, en parte, a la escasa preservación del patrimonio construido en tierra, las afectaciones causadas por eventos sísmicos, la deficiente aplicación de técnicas constructivas por falta de mano de obra calificada, la sustitución de obras antiguas, por el afán de modernizar y la transmisión generacional de vacíos en las técnicas de construcción [1].

A nivel internacional, la arquitectura en tierra ha experimentado un renovado interés debido a su estrecha relación con los principios de sostenibilidad y adaptación al cambio climático. Diversos estudios señalan que la tierra cruda constituye un material de construcción que reduce el consumo de energía, es respetuoso con el medio ambiente y proporciona un clima interior saludable y confortable. Este resurgimiento también se refleja en la amplia presencia histórica y contemporánea de construcciones en tierra en regiones como Francia, España, Portugal, el Magreb, México, Perú, Brasil y China, donde su transmisión artesanal ha permitido preservar conocimientos empíricos sobre sus propiedades higrotérmicas y mecánicas [2], [26]. Otra de las razones por las que la tierra es elegida como material de construcción para los cerramientos es su inercia térmica. La inercia térmica es la resistencia que presenta todo cuerpo a variar su temperatura, acumulando en su interior la energía térmica que reciben. La variable que expresa esta propiedad en los materiales es la difusividad térmica y depende del coeficiente de conductividad térmica, el calor específico y la densidad [3].

Estudiar la tierra mediante técnicas de caracterización nos ayuda a evaluar su idoneidad como material de construcción, ya que permite conocer su composición y comportamiento mecánico. Por esta razón se requiere la combinación de diferentes técnicas de caracterización que permitan analizar tanto su composición química como su estructura cristalina y su comportamiento térmico.

La primera de ella es la fluorescencia de rayos X (XRF), la cual es una técnica de análisis elemental ampliamente utilizada en diversas disciplinas, como la geología, la industria, la investigación científica y el control de calidad. Su importancia radica en su capacidad para identificar y cuantificar los elementos presentes en una muestra de forma no destructiva y precisa, lo que la convierte en una herramienta esencial para estudiar la composición de materiales en diferentes estados: sólidos, líquidos o polvos [4].

Los resultados obtenidos mediante XRF consisten en un espectro que muestra la intensidad de los rayos X emitidos por los elementos presentes en la muestra. A partir de estos espectros, se puede identificar qué elementos están presentes y en qué concentración, proporcionando una imagen clara y cuantitativa de la composición del material [5].

De manera complementaria, se realizaron pruebas de difracción de rayos X (XRD), donde en un difractómetro, las diferentes fases cristalinas de un material muestran diferentes patrones de difracción, cuya identificación se puede realizar comparando los patrones ya obtenidos de muestras desconocidas con los patrones de bases de datos de referencia. Esto con el fin de obtener y analizar información de la composición química, la estructura cristalina, el tamaño de los cristales, la deformación de redes, la orientación preferida y el espesor de las capas de una amplia gama de materiales, desde polvos hasta sólidos, películas finas y líquidos [6].

Finalmente, la calorimetría diferencial de barrido (DSC), la cual destaca como una de las más utilizadas, dado que permite estudiar procesos asociados a variaciones de entalpía, incluyendo transiciones de primer y segundo orden [7]. Además de información importante de cuando aumenta o disminuye la temperatura y como la muestra se somete a una transformación física y si será necesario fluir más o menos calor hacia ella que hacia la referencia para mantener

ambas a la misma temperatura. Es decir, el DSC nos da información de los cambios de entalpía en las muestras debido a cambios en su estado físico y propiedades químicas en función de la temperatura o el tiempo [8]

Esta caracterización forma parte del proyecto de investigación “La incidencia del uso de la tierra de la Ciudad de Liberia como material constructivo en el desempeño higrotérmico de los espacios internos mediante técnicas de simulación” desarrollado de manera conjunta por las escuelas de Arquitectura y Urbanismo, Agronomía, y Ciencia e ingeniería de los materiales del Instituto Tecnológico de Costa Rica, en cooperación con la Asociación para la Cultura de Liberia. Los datos obtenidos son requeridos para poder alimentar el software de simulación higrotérmica.

Materiales y métodos (metodología)

Para este estudio se contó con tres tipos de muestra de suelos diferentes recolectados en la ciudad de Liberia, Guanacaste.

- La Muestra #1: Recolectada de una pared de una de las casas construidas con bahareque que se ubicaban en el centro de la ciudad de Liberia.
- La Muestra #2: Recolectada directamente del suelo en un lote al lado de la carretera que lleva al volcán Rincón de la Vieja, que es el material empleado en la restauración de los inmuebles patrimoniales.
- La Muestra #3: Recolectada de una de las paredes de bahareque la Casa de la Cultura o Museo del Sabanero, declarada Patrimonio Histórico Cultural de Costa Rica, previo al proceso de restauración.

Fluorescencia de rayos x (XRF)

Para el análisis, se pulverizaron las muestras en un pulverizador de anillos hasta la malla número 325 y se compactaron para que la muestra fuera mayormente homogénea. De igual manera, durante todas las pruebas, para que la muestra de análisis fuera representativa se utiliza un cuarteador de Jones. Además, la norma ASTM E1621 describe la guía general para el análisis elemental de materiales mediante fluorescencia de rayos X por dispersión de longitud de onda.

Difracción de rayos X (XRD)

El escaneo se realizó en un rango angular de 2θ que va desde 10.0064° hasta 84.9904°, lo que permite obtener información sobre la estructura cristalina de cada muestra.

Las mediciones se llevaron a cabo utilizando un difractómetro modelo EMPYREAN, configurado con una geometría Theta/Theta. La fuente de rayos X empleó un ánodo de cobre (Cu), con longitudes de onda características de Kα1 = 1.54060 Å, Kα2 = 1.54443 Å y Kβ = 1.39225 Å. El generador de rayos X operó a una tensión de 45 kV y una corriente de 40 mA. El detector funcionó en modo de escaneo utilizando un Detector de Posición Sensible (PSD), y no se empleó monocromador durante la medición. Se utilizó una rendija de divergencia fija de 0.4354° y la rotación de la muestra (spinning) estuvo activada para mejorar la representatividad de la medición.

En cuanto a los parámetros de medición, el análisis se realizó en un modo de escaneo continuo, con un tamaño de paso angular de 0.0130° y un tiempo de adquisición por paso de 37.995 segundos. Las mediciones se efectuaron a temperatura ambiente, aproximadamente 25 °C.

Respecto a las condiciones de la muestra, se utilizó un montaje en configuración Reflection-Transmission Spinner. La longitud irradiada de la muestra fue de 10 mm, y esta se preparó en forma de polvo compacto.

Diferencial de barrido (DSC)

Se siguió la norma ASTM 1269 para calcular el calor específico por medio de la técnica DSC, para esto se realizó el estudio a una cápsula vacía, a una referencia que en este caso fue platino y a las 3 muestras con los siguientes pasos:

- Rampa hasta 0 °C con un paso de 20 °C/min.
- Isoterma en 0 °C durante 4 min.
- Rampa de 0 °C hasta 400 °C con un paso de 20 °C/min.
- Isoterma en 400 °C durante 4 min.

Posterior a esto se realizaron los cálculos para obtener el calor específico de las tierras, donde C_{pref} es el calor específico del platino, $D_{muestra}$ es la distancia de la curva DSC entre la cápsula vacía y la muestra para una temperatura específica y D_{ref} es la distancia de la curva DSC entre la cápsula vacía y la referencia de platino para una temperatura específica.

Resultados

Resultado de fluorescencia de rayos x

Análisis de datos de fluorescencia de rayos x

Un estudio preliminar indica que la composición química de los materiales en tierra está dominada por el dióxido de silicio (SiO_2), lo que lo convierte en el componente principal en arcillas y suelos destinados a construcción. Le siguen el óxido de aluminio (Al_2O_3), el óxido de hierro (Fe_2O_3) y, en menor proporción, el óxido de calcio (CaO). Estos cuatro compuestos son relevantes porque influyen directamente en la estabilidad estructural, la resistencia térmica y mecánica, la durabilidad frente al desgaste y la capacidad de cohesión del material. Por ello, constituyen la base para interpretar los porcentajes obtenidos mediante fluorescencia de rayos X y valorar el potencial constructivo de la tierra analizada [9].

Tabla 1. Análisis cuantitativo de los componentes presentes en las tres muestras recolectada en la Casa de Liberia.

Componente	Muestra 1 (%)	Muestra 2 (%)	Muestra 3 (%)
SiO_2	62.87	59.03	68.15
$AlcO_3$	11.58	16.94	13.53
Fe_2O_3	12.18	14.80	10.80
K_2O	7.39	3.45	3.82
CaO	3.56	2.65	2.14
TiO_2	1.02	1.19	1.01
MnO	0.72	0.31	0.22
ZrO_2	0.07	0.07	0.05

Se observa que la suma de los óxidos cuantificados por XRF no alcanza el 100% en ninguna de las tres muestras (entre 98.4% y 99.7%). Este remanente es atribuible a componentes que la técnica de XRF no cuantifica directamente, principalmente materia orgánica, agua estructural

y otros compuestos volátiles, cuya determinación requeriría un ensayo complementario de perdida por calcinación (LOI, por sus siglas en inglés), el cual no fue realizado en el marco de este estudio. Se recomienda incorporar esta determinación en trabajos futuros para cerrar completamente el balance de masa.

Muestra #1 – Casa Liberia

En la tabla 1, columna 1 correspondiente a los resultados obtenidos para la primera muestra de tierra (muro o pared) tomada en La Casa de Liberia. En esta muestra destaca el alto porcentaje de dióxido de silicio (SiO2), que corresponde a un 62.87%. Este compuesto, también conocido como sílice, es un componente clave en muchos tipos de suelo, especialmente en arenas y rocas. De acuerdo con las literaturas consultadas, el SiO_2 suele ser el óxido mayoritario en materiales a base de tierra utilizados en construcción, situándose como el componente predominante en arcillas y suelos empleados para muros y cerramientos [3], [9], [10], [11], [27], [28]. Su alta presencia aporta estabilidad, baja expansividad y resistencia a la intemperización, cualidades relevantes cuando la tierra se utiliza únicamente como pared o cerramiento y no como elemento estructural, especialmente en edificaciones donde la estructura portante es de madera, tal como se documenta en sistemas mixtos tierra-madera [11].

También, la sílice es muy resistente a la intemperización y a los procesos de erosión química. Esto contribuye a la durabilidad y su capacidad de mantener sus propiedades físicas y mecánicas a largo plazo, además, no son expansivos. Esto significa que no se expanden ni se contraen significativamente con cambios en la humedad, lo cual es ideal para evitar problemas como el agrietamiento de estructuras o asentamientos diferenciales en los cimientos [9].

Para el caso de la concentración de óxido de aluminio, esta es moderada, lo que sugiere una presencia significativa de minerales aluminosos, posiblemente micas o feldespatos y contribuye a la cohesión interna y al comportamiento térmico del material, aspectos señalados en estudios previos sobre tierras para construcción y en la literatura asociada a minerales aluminosos [12], [9], [11]. El óxido de hierro (Fe_2O_3), con un 12.18%, se encuentra dentro de los rangos observados en arcillas destinadas a muros y ladrillos, influyendo tanto en la coloración como en la durabilidad frente al desgaste, lo cual coincide con su descripción como hierro no silícico presente en forma de óxidos libres [12], [9], [11].

El contenido de óxido de potasio (K_2O) en la muestra fue de 7.39%, lo cual indica una cantidad importante de potasio total en el suelo. Los minerales ilítico, comúnmente presentes en suelos meteorizados, retienen el potasio entre sus capas cristalinas, lo que impide su liberación fácil a la solución del suelo. En este sentido, aunque el K esté presente en cantidad significativa, gran parte de él podría encontrarse en formas no intercambiables o estructurales, especialmente si se ha fijado en minerales como la ilita o atrapado en zonas con condiciones de contracción-expansión como en las esmectitas [13],[14].

El contenido de óxido de calcio (CaO) en la muestra de tierra fue de 3.56%. En suelos tropicales intensamente meteorizados, como los de la región de Guanacaste, es común que los carbonatos se disuelvan por lixiviación, por lo que esta concentración podría reflejar zonas menos alteradas o aportes mineralógicos secundarios. Es relevante mencionar que, según la literatura, suelos con bajo contenido de CaO como este (<4%) pueden favorecer, bajo tratamientos térmicos, la formación de fases como la hematita, un óxido de hierro antiferromagnético característico de ambientes altamente meteorizado [15].

El contenido de óxido de manganeso (MnO) en la muestra de suelo fue de 0.72%, equivalente a aproximadamente 5,600 mg/kg de manganeso total. Para los niveles típicos de manganeso en suelos no contaminados varían entre 40 y 900 mg/kg. Por tanto, el valor encontrado en esta muestra supera ampliamente ese rango, lo que podría estar relacionado con un origen

volcánico o mineralógico particular del sitio y se encuentra usualmente en forma de óxidos como la pirolusita (MnO_2), carbonatos o silicatos [16]. Por último, la baja cantidad de óxido de titanio indica una baja pero notable presencia de minerales como ilmenita o rutilo [17].

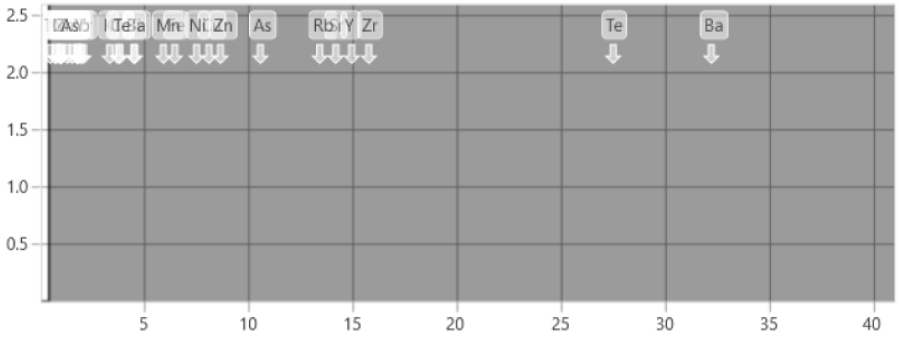


Figura 1. Diagrama de concentración relativa de elementos traza para la muestra 1.

Muestra #2 – Carretera al volcán

Esta muestra destaca por tener el mayor porcentaje de óxido de aluminio (Al_2O_3), el cual es un componente importante en arcillas y contribuye directamente a la cohesión interna del material, su estabilidad térmica y su capacidad de mantener su integridad en ciclos de humedad-sequedad [9],[10],[18]. En el contexto de esta investigación, una mayor proporción de alúmina puede favorecer el desempeño de la tierra cuando se emplea como pared o cerramiento no portante, ya que incrementa su cohesión y su resistencia a la deformación sin requerir propiedades mecánicas propias de elementos estructurales.

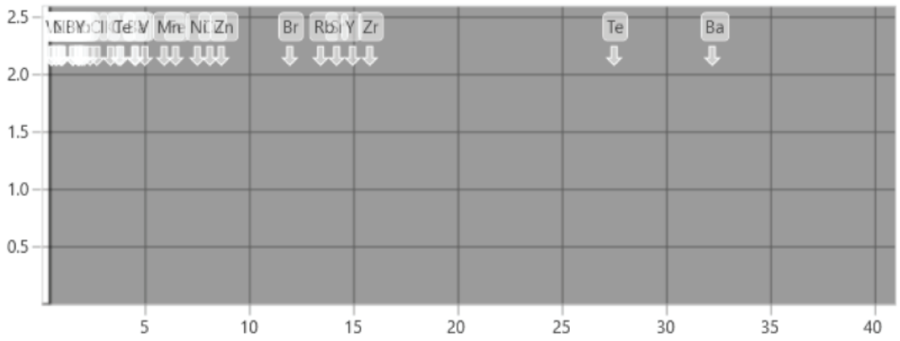


Figura 2. Diagrama de concentración relativa de elementos traza para la muestra 2.

Por otro lado, esta muestra fue obtenida en la zona más cercana a un volcán, lo que refleja ligeramente una mayor concentración de minerales relacionados con ambientes volcánicos, como el Fe_2O_3 (óxido de hierro) y el TiO_2 (óxido de titanio) en comparación con las otras muestras [19].

En cuanto al óxido de potasio (K_2O), su valor más bajo (3.45%) podría estar relacionado con la variabilidad mineralógica entre sitios de muestreo, ya que los minerales ilíticos o arcillosos típicos de ambientes volcánicos pueden fijar el potasio de manera más estable en su estructura [13]. Para el caso de óxido de calcio (CaO) y óxido de manganeso (MnO) no difieren mucho de los anteriores.

Con respecto al contenido de zirconio (Zr), este permanece prácticamente constante en comparación con las otras muestras, lo que indica que no hay una variación significativa en este componente mineral. Por otro lado, aunque el dióxido de silicio (SiO_2) sigue siendo el componente predominante, su concentración es ligeramente menor que en la Muestra 1. Esta diferencia podría estar asociada a una mayor diversidad mineralógica en la Muestra 2, posiblemente influenciada por el entorno volcánico del sitio de recolección. A diferencia de la muestra 1, en esta muestra se detectaron elementos típicamente asociados a procesos volcánicos, como azufre (S), cloro (Cl), vanadio (V) y bromo (Br), aunque en concentraciones bajas o cercanas al límite de detección.

Muestra #3 – Casa de la Cultura

La composición química de esta muestra es similar a la de las muestras anteriores, destacando nuevamente el elevado contenido de dióxido de silicio (SiO_2), adecuado para materiales de cerramiento debido a su estabilidad y baja expansividad [9]. Aunque esta muestra proviene de un material previamente mezclado y no a un suelo natural sus valores de SiO_2, Al_2O_3 y Fe_2O_3 permanecen dentro de los rangos reportados para tierras utilizadas en muros no portantes [10], [11]. Estos factores pueden ser favorables para el uso de este tipo de suelo en aplicaciones constructivas, ya que la sílice tiene una baja expansividad y es resistente a la intemperización [9].

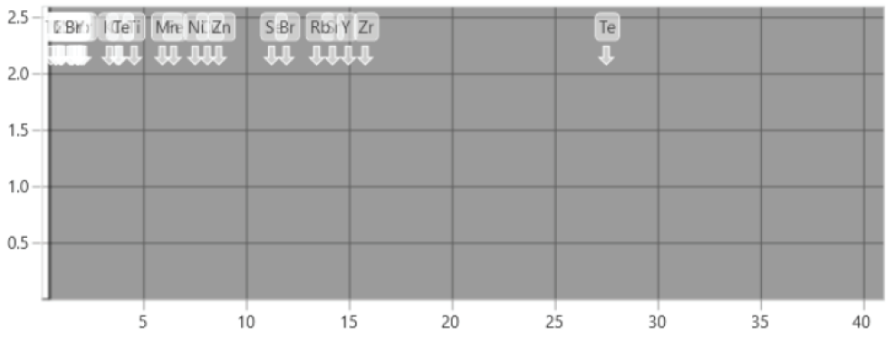


Figura 3. Diagrama de concentración relativa de elementos traza para la muestra 3.

Por otro lado, el Al_2O_3, presente en un nivel moderado, sugiere la presencia de minerales aluminosos que podrían contribuir a la capacidad de retención de agua y nutrientes en el suelo [12][18]. El Fe_2O_3, aunque en menor concentración, indica la presencia de minerales ferrosos que podrían aportar coloración y estabilidad química [13].

El bajo porcentaje de TiO_2 podría indicar una pequeña presencia de minerales titaníferos como rutilo o ilmenita [17], mientras que el ZrO_2 refleja la presencia de circón, aunque en cantidades mínimas, igual que las otras muestras. Para el caso de óxido de calcio (CaO), óxido de potasio(K_2O) y óxido de manganeso (MnO) no difieren mucho con la muestra 2.

Por último, a diferencia de las otras muestras esta presentó un porcentaje de selenio en una concentración de 0.0140 wt% lo cual es relativamente bajo, pero esto puede estar relacionado con la influencia de procesos volcánicos en la región. En estudios anteriores se ha observado que la deposición de selenio en suelos cercanos a volcanes activos puede estar vinculada a la emisión de gases volcánicos [20].

Resultados de calor Específico

Tabla 2. Valores de calor específico (Cp) obtenidos por DSC a diferentes temperaturas para las muestras M1, M2 y M3, y su promedio en el rango 25–375 °C.

Temperatura (°C)	Cp M1 J/(g·K)	Cp M2 J/(g·K)	Cp M3 J/(g·K)
25	0.694	0.738	0.720
50	0.868	0.904	0.921
75	1.000	1.198	1.249
100	0.946	1.169	1.092
125	0.836	0.922	0.859
150	0.778	0.836	0.788
175	0.760	0.797	0.762
200	0.789	0.798	0.792
225	0.775	0.803	0.763
250	0.960	0.904	0.902
275	0.987	1.375	1.439
300	0.775	0.875	0.821
325	0.764	0.846	0.788
350	0.777	0.834	0.795
375	0.830	0.889	0.858
Promedio	0.836	0.926	0.903

Muestra #1

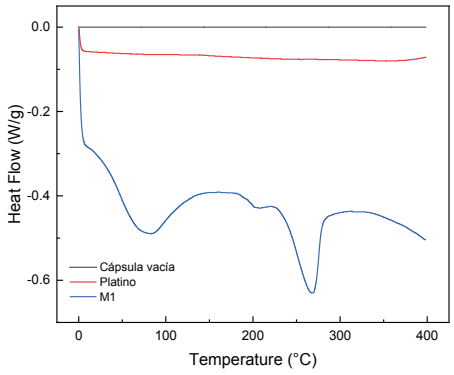


Figura 4. Curva DSC para obtener el calor específico de la muestra M1.

Inicialmente, es importante destacar que el proceso observado es de naturaleza endotérmica, ya que implica la absorción de calor por parte de la muestra a medida que se incrementa la temperatura. En una curva DSC, este comportamiento se representa mediante valores negativos en el eje de flujo de calor (W/g), lo cual indica que el sistema requiere energía para que ocurra una determinada transición térmica. Estos eventos se manifiestan como picos descendentes en la gráfica, característicos de los procesos endotérmicos en el análisis térmico diferencial [21].

En la curva correspondiente a la muestra M1 (Figura 4), se observa un pico endotérmico pronunciado antes de los 100 °C, atribuible a la deshidratación física del suelo, específicamente a la pérdida de agua intersticial o de adsorción. Este tipo de agua puede dividirse en fuertemente unida (agua higroscópica) y débilmente unida (capa de humedad), siendo esta última la que se pierde por debajo de los 100 °C, como ocurre en este caso [22].

Asimismo, se identifica un segundo pico notable alrededor de los 275 °C, con una absorción aproximada de -0.6 W/g. Este comportamiento refleja una alta demanda energética, probablemente asociada a la descomposición de materia orgánica presente en el suelo, como residuos vegetales o compuestos de bajo peso molecular [21]. Estos procesos no solo involucran la absorción de calor, sino que también suelen acompañarse de una pérdida de masa atribuida a la liberación de agua en sus diferentes formas: humedad superficial, agua de cristalización o agua estructural [22].

Este mismo pico también puede estar relacionado con la deshidratación de minerales, incluyendo agua adsorbida y agua de enlace asociada a cationes entre los planos estructurales. En particular, en minerales como los hidróxidos de hierro, por ejemplo, la goetita, se han reportado picos endotérmicos entre los 290 °C y 330 °C debido a procesos de deshidroxilación (α–FeOOH → α–Fe_2O_3 + H_2O). La posible superposición de estos eventos térmicos puede generar interferencias que dificultan el análisis cuantitativo de los patrones obtenidos mediante DSC [22]

Muestra 2 y 3

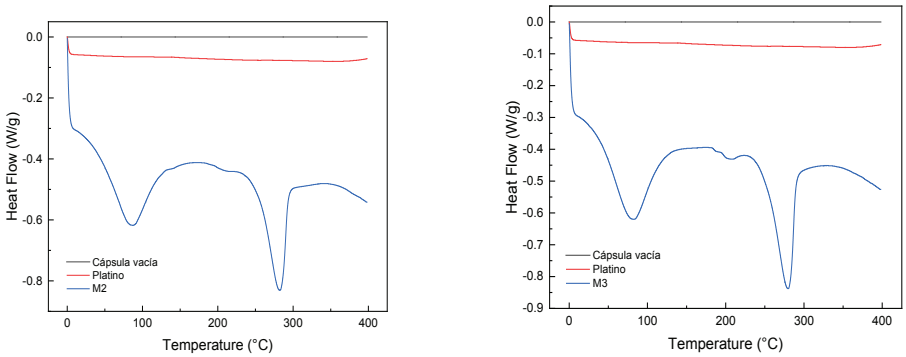


Figura 5. Curva DSC para obtener el calor específico de la muestra M2 (A) vs M3 (B).

Las curvas DSC de las muestras M2 y M3 presentan perfiles térmicos similares entre sí y también con respecto a la muestra M1, lo que sugiere una composición general comparable. Ambas muestran un pico endotérmico bien definido por debajo de los 100 °C, atribuible a la pérdida de agua superficial o humedad físicamente adsorbida, lo cual es consistente con fenómenos de deshidratación inicial reportados [24]. Esta etapa representa una deshidratación física sin transformación estructural. En el rango entre 100 °C y 200 °C no se observan eventos térmicos relevantes, lo que indica una baja presencia de agua de coordinación en estas muestras [23].

El evento térmico más destacado se presenta entre los 250 °C y 300 °C, donde ambas muestras muestran un pico endotérmico profundo, con valores cercanos a -0.85 W/g en el caso de M3. Este comportamiento es compatible con procesos de descomposición de materia orgánica o reacciones de transformación de fases menores presentes en el suelo.

Análisis XRD – Muestra 1

A partir de la comparación con bases de datos de referencia, se identificaron las siguientes fases cristalinas:

- 00-010-0361: Potassium Sodium Aluminum Silicate — $Na_{0.71}K_{0.29}AlSi_3O_8$
- 01-075-1634: Sodium Potassium Aluminum Silicate — $(Na_{0.85}K_{0.14})(AlSi_3O_8)$
- 01-075-1631: Sodium Potassium Aluminum Silicate — $(Na_{0.667}K_{0.333})(AlSi_3O_8)$

Las tres fases corresponden a aluminosilicatos del grupo de los feldespatos alcalinos, típicos en materiales geológicos de origen ígneo.

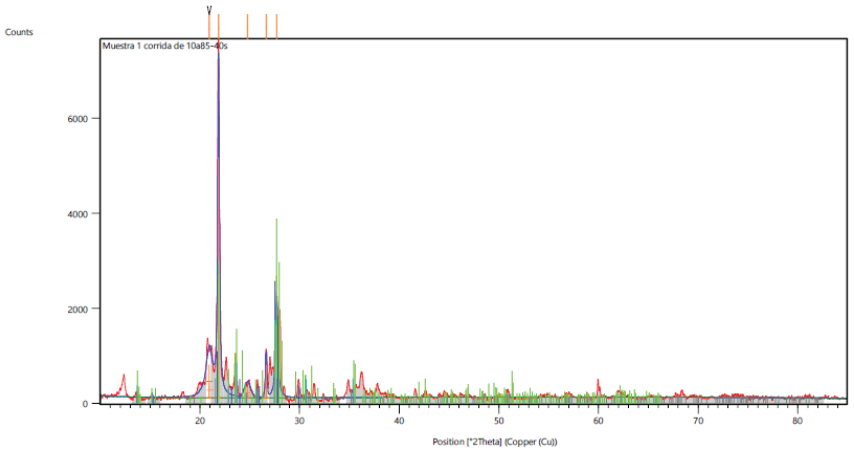


Figura 6. Difractograma de muestra 1.

Patrones de difracción

Tabla 3. Picos principales observados en el difractograma de muestra 1.

Posición (°2θ)	Intensidad Relativa (%)	d-spacing (Å)
21.8511	100.00	4.06419
21.9061	50.00	4.06419
27.6763	30.30	3.22058
27.7465	15.15	3.22058

Estos picos representan las zonas con mayor intensidad de difracción, lo cual indica planos cristalográficos con alta densidad atómica en la muestra.

Análisis de Resultados

El difractograma de la Muestra 1 revela un alto grado de cristalinidad, lo que se nota a través de picos simétricos, estrechos e intensos. Esto señala una estructura mineral bien ordenada y un material con poca meteorización. El plano cristalográfico típico (201)/(–201) del sistema feldespático (Na,K)$AlSi_3O_8$, que se encuentra en 21.8511° (2θ) con un d-spacing de 4.064 Å, es el pico principal. Este plano es uno de los más representativos dentro de los feldespatos alcalinos y su intensidad confirma que esta fase domina la mineralogía de la muestra [24]. La

presencia de picos duplicados cercanos (como en 21.8511° y 21.9061°) sugiere variaciones composicionales o estructurales menores dentro del mismo grupo cristalino, o la coexistencia de fases muy similares estructuralmente.

Adicionalmente, los picos ubicados alrededor de 27.6–27.7° (d ≈ 3.220 Å) coinciden con el plano (002), que es un rasgo distintivo de los feldespatos sódico-potásicos [24]. La existencia de estos planos señala una red tridimensional no expansiva, rígida y estable, lo cual es particularmente significativo en los materiales utilizados para la arquitectura de tierra. Esto se debe a que disminuye la propensión a deformaciones debido a alteraciones higrométricas y favorece la longevidad del muro.

Al tratarse de un material constituido por fases no expansivas, estables y resistentes a la meteorización, la tierra utilizada en la construcción original posee cualidades fundamentales para la conservación de muros de bahareque, permitiendo que mantengan su integridad estructural ante ciclos de humedad-sequedad propios del clima cálido de Liberia, ya que estos resultados son consistentes con materiales utilizados en aplicaciones cerámicas, geotécnicas o como indicadores de alteración mineralógica en estudios de suelos.

Cabe señalar que la condición de estabilidad y baja expansividad descrita responde principalmente al predominio de feldespatos alcalinos y cuarzo, fases mineralógicamente estables idénticas por XRD. Sin embargo, esto no implica una ausencia total de minerales arcillosos en el material. En los sistemas de bahareque, la fracción arcillosa, aunque minoritaria frente a las fases feldespáticas y cuarzosas, cumple un papel distinto y complementario: actúa como aglutinante, otorgando la plasticidad y cohesión necesarias para adherir la tierra a la estructura de caña o madera durante la aplicación húmeda y para mantener la integridad del repello una vez seco. Es precisamente el balance entre una matriz mayoritariamente no expansiva (que limita el agrietamiento por ciclos de humedad – sequedad) y una fracción arcillosa suficiente (que aporta cohesión y trabajabilidad) lo que explica el buen desempeño histórico de estas tierras como material de cerramiento en la región.

Análisis XRD – Muestra 2

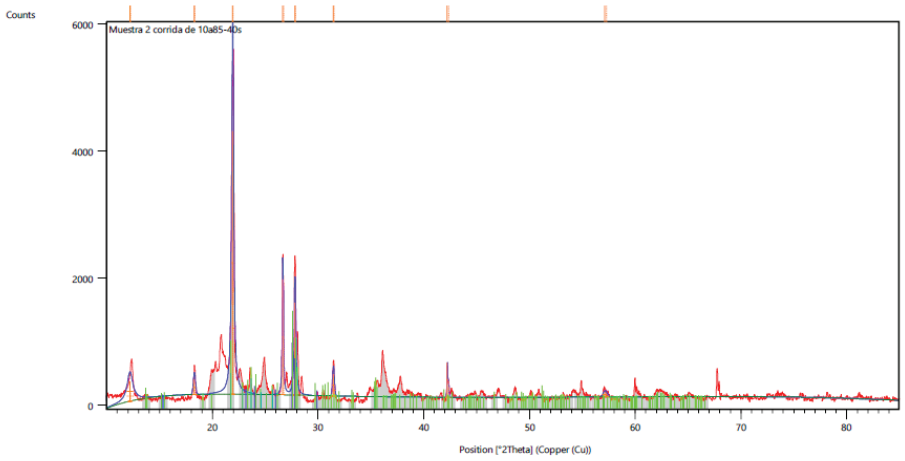


Figura 7. Difractograma de muestra 2.

Patrones de difracción

Tabla 4. Picos principales observados en el difractograma de muestra 2.

Posición (°2θ)	Intensidad Relativa (%)	d-spacing (Å)
21.911	100.00	4.05325
21.966	50.00	4.05325
26.6492	43.82	3.34233
27.8084	35.03	3.20558

Análisis de fases

Las fases cristalinas identificadas con mayor probabilidad en la muestra son:

- 00-010-0361: Potassium Sodium Aluminum Silicate — $Na_{0.71}K_{0.29}AlSi_3O_8$
- 01-075-1632: Sodium Potassium Aluminum Silicate — $(Na_{0.75}K_{0.25})(AlSi_3O_8)$

Ambas corresponden a feldespatos alcalinos, minerales comunes en matrices geológicas y suelos de origen ígneo o metamórfico.

Análisis de Resultados

El difractograma de la muestra 2 evidencia una estructura cristalina bien definida, como lo indican los picos estrechos y simétricos, con intensidades altas. El pico más intenso aparece en 21.911° (2θ) con una intensidad relativa del 100%, seguido de varios picos secundarios que conservan el mismo valor de *d-spacing*, acompañado por un pico cercano en 21.966°, lo cual indica ligeras variaciones composicionales dentro de la misma fase feldespática asociadas a sustituciones Na^+/K^+ en el sistema $(Na,K)AlSi_3O_8$. La presencia de varios picos secundarios definidos, aun cuando corresponden a fases cristalinas similares, sugiere que el material del suelo conserva un grado de heterogeneidad natural mayor que el observado en la Muestra 1, aspecto esperable en depósitos sin intervención constructiva.

Adicionalmente, el difractograma muestra un pico claro en 26.649° (2θ) (d = 3.342 Å). El pico característico del cuarzo α, de acuerdo con la bibliografía mineralógica, se encuentra exactamente en 26.6° (plano (101)), lo cual significa que este valor es completamente congruente con el comportamiento anticipado de esta fase [25]. La presencia de cuarzo libre como elemento adicional es consistente con suelos que provienen de materiales volcánicos e ígneos, y es la principal diferencia con respecto a la Muestra 1, en la cual esta fase es menos notoria.

Análisis XRD - Muestra 3

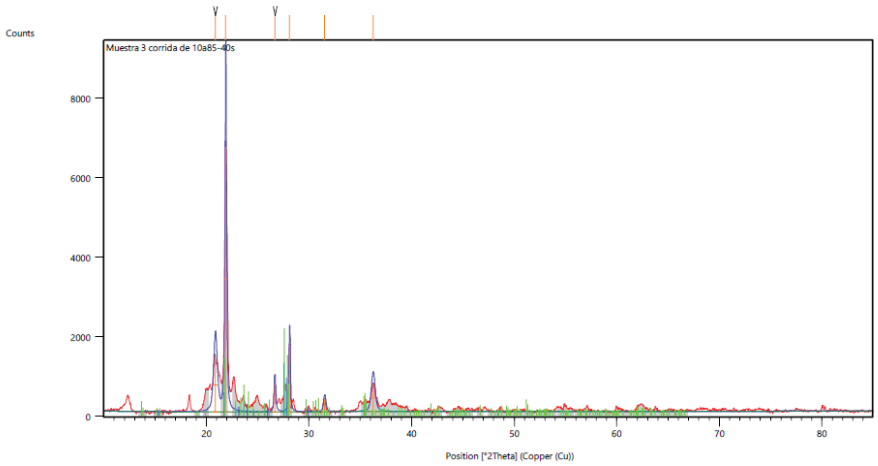


Figura 8. Difractograma de muestra 3.

Análisis de fases

Las fases identificadas a partir de la base de datos son:

- 00-010-0361: Potassium Sodium Aluminum Silicate — $Na_{0.71}K_{0.29}AlSi_3O_8$
- 01-075-1632: Sodium Potassium Aluminum Silicate — $(Na_{0.75}K_{0.25})(AlSi_3O_8)$

Ambas corresponden a aluminosilicatos alcalinos, típicos de matrices minerales naturales como feldespatos.

Patrones de difracción

Tabla 5. Picos principales observados en el difractograma de muestra 3.

Posición (°2θ)	Intensidad Relativa (%)	d-spacing (Å)
21.8754	100.00	4.06309
28.0927	25.10	3.17642
20.8746	20.17	4.25557
36.2381	10.48	2.47896

El pico más intenso a 21.8754° coincide con planos altamente ordenados, comúnmente asociados con minerales feldespáticos.

Análisis de Resultados

Este patrón de difracción muestra una distribución clara de picos con intensidades bien definidas, indicando una estructura cristalina dominante. El pico más intenso se encuentra en 21.8754° (2θ) con un *d-spacing* de 4.06309 Å, reflejando una fase cristalina bien organizada y probablemente predominante en la muestra.

La composición mineralógica está dominada por aluminosilicatos de sodio y potasio, lo que coincide con la presencia de feldespatos alcalinos. Estos compuestos son característicos de suelos derivados de rocas ígneas o metamórficas, y su presencia sugiere una fuerte componente geológica en el origen de la muestra.

A diferencia de la Muestra 2, donde el material presentaba una mayor variabilidad inherente al suelo natural, la Muestra 3 exhibe un difractograma más compacto, con menor dispersión de reflexiones, señal de un material más homogéneo y con menos fluctuaciones en su composición mineral. Este tipo de patrón generalmente está vinculado a materiales que han mantenido su estabilidad en un ambiente de construcción, sin sufrir procesos significativos de alteración o meteorización. En general, la Muestra 3 conserva la coherencia mineralógica que se observó en el estudio y muestra una condición estructural interna que indica una preservación apropiada del material.

Conclusiones y/o recomendaciones (discusión)

Se demostró que las tierras recogidas en Liberia tienen un predominio de SiO_2, con cantidades intermedias de Fe_2O_3 y Al_2O_3, así como fases feldespáticas muy cristalinas, a través de una caracterización integral que se realizó usando XRD, DSC y XRF. Esta composición es típica de los materiales en tierra que se emplean como cerramientos no portantes y presenta buena estabilidad química, escasa expansión y resistencia a la intemperización. El análisis térmico realizado por DSC reveló transiciones endotérmicas relacionadas con la descomposición orgánica y la pérdida de humedad, lo que confirma el material como térmicamente estable.

Adicionalmente, esta caracterización permitió determinar el calor específico de las muestras, información que junto con los valores de conductividad térmica constituye un requisito indispensable para alimentar el software de simulación higrotérmica del proyecto. Dichas simulaciones permitían demostrar que los muros poseen una alta inercia térmica, capacidad que contribuye a la estabilización de la temperatura interna a lo largo del año en climas cálidos como el de Liberia. Adicionalmente, los resultados obtenidos no solo confirman el potencial técnico de la tierra local como material de cerramiento, sino que también ponen en valor esta técnica constructiva desde una perspectiva cultural, científica y bioclimática.

Agradecimientos

Este trabajo fue posible gracias al apoyo de la Vicerrectoría de Investigación y Extensión (VIE) del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Los autores expresan también su agradecimiento al Centro de Investigación y Extensión en Ciencias e Ingeniería de los Materiales (CIEMTEC) por el acceso a los equipos analíticos y por la asistencia técnica brindada durante el proceso de caracterización.

Referencias

[1] Á. J. Hernández Carazo, "¿Por qué Costa Rica desconfía de la arquitectura de tierra?," *XVII Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra (SIACOT)*, La Paz, Bolivia, Oct. 9–12, 2017. [En línea]. Disponible en: https://share.google/sJXzdyiPcDIVDgCue

[2] R. J. Ansaa-Asare, A. Razakamanantsoa, E. Hamard, M. Duc, B. Cazacliu, and L. Verron, "Impact of earth variability and implementation processes on hydromechanical and microstructure properties of sustainable construction materials," *Construction and Building Materials*, vol. 417, p. 135303, Feb. 2024. [En línea]. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135303

[3] M. Carcedo Fernández, *Resistencia a compresión de bloques de tierra comprimida estabilizada con materiales de sílice de diferente tamaño de partícula*, Trabajo Fin de Máster, Univ. Politécnica de Madrid, Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica, Madrid, España, 2012. [En línea]. Disponible en: https://oa.upm.es/10672/3/TESIS_MASTER_MIGUEL_CARCEDO_FERNANDEZ.pdf

[4] ThermoFisher Scientific, "What is XRF (X-ray fluorescence) and How Does it Work?," *Ask a Scientist*, Jan. 28, 2020. https://www.thermofisher.com/blog/ask-a-scientist/what-is-xrf-x-ray-fluorescence-and-how-does-it-work/

[5] K. Wirth and A. Barth, "X-Ray Fluorescence (XRF)," *Techniques*, Oct. 2019. https://serc.carleton.edu/research_education/geochemsheets/techniques/XRF.html

[6] J. Xiao, Y. Song, and Y. Li, "Comparison of Quantitative X-ray Diffraction Mineral Analysis Methods," *Minerals*, vol. 13, no. 4, p. 566, 2023. https://doi.org/10.3390/min13040566

[7] D. F. Venegas Vasconez, *Calorimetría diferencial de barrido*, 2017. [En línea]. Disponible: ResearchGate, public. n.º 316860989. Disponible en https://www.researchgate.net/profile/Diego-VenegasVasconez/publication/316860989_CALORIMETRIA_DIFERENCIAL_DE_BARRIDO/links/5914a4aeaca27200fe4e8a07/CALORIMETRIA-DIFERENCIAL-DE-BARRIDO.pdf

[8] M. Barreto Gutiérrez, *Aplicación de la calorimetría diferencial de barrido (DSC) en el análisis de materiales poliméricos de piezas automotrices*, Memoria de experiencia profesional, Facultad de Ingeniería Química, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México. http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/jspui/bitstream/DGB_UMICH/8256/1/FIQ-L-2021-0811.pdf

[9] S. Ibenyahia, *Optimization Analysis of Clay and Earth-Based Construction Materials' Formulation*, Bachelor Thesis, School of Science and Engineering, Al Akhawayn University, Ifrane, Morocco, Apr. 25, 2023. [En línea]. Disponible en: https://cdn.aui.ma/sse-capstone-repository/pdf/spring-2023/OPTIMIZATION%20ANALYSIS%20OF%20CLAY%20AND%20EARTH-BASED%20CONSTRUCTION%20MATERIALS'%20FORMULATION.pdf

[10] X. Gu and Y. Ling, "Characterization and properties of Chinese red clay for use as ceramic and construction materials," *Science Progress*, vol. 107, no. 1, pp. 1–17, 2024, doi: 10.1177/00368504241232534

[11] M. Serpilli, F. Stazi, G. Chiappini, and S. Lenci, "Earthen claddings in lightweight timber framed buildings: An experimental study on the influence of fir boards sheathing and GFRP jacketing," *Construction and Building Materials*, vol. 285, p. 122896, May 2021, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122896

[12] T. V. Tagle, «¿Como se forma el aluminio en el suelo y cuáles son sus consecuencias?», *Nova Agro*, 30 de junio de 2024. https://novaagro.cl/como-se-forma-el-aluminio-en-el-suelo-y-cuales-son-sus-consecuencias/

[13] O. Acevedo-Sandoval, E. Ortiz-Hernández, M. Cruz-Sánchez, y E. Cruz-Chávez, «El papel de óxidos de hierro en suelos», *Terra Latinoamericana*, vol. 22, n.o 4, pp. 485-497, ene. 2004, [En línea]. Disponible en: https://www.redalyc.org/pdf/573/57311096013.pdf

[14] Conti, M. E. 2004. Dinámica de la Liberación y Fijación de Potasio en el Suelo. Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires, Argentina. Disponible en : https://www.studocu.com/es-mx/document/universidad-ymca/anatomia-y-fisiologia/dinamica-de-la-liberacion-y-fijacion-de-potasio-en-el-suelo/21191864

[15] A. Alvarado-Hernández, J. C. Mora-Baeza, M. Vázquez-Cruz y A. L. Gómez-Merino, "Contenido de carbonatos de calcio y su relación con óxidos metálicos en un Andisol", *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, vol. 8, núm. 1, pp. 11, 2017. [En línea]. Disponible en: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-33222017000100261

[16] Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR), *Toxicological Profile for Manganese*, U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, Atlanta, GA, 2012. [En línea]. Disponible en: https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp151.pdf

[17] A. A. Rodríguez-Pinos, K. G. Salazar-Llangarí, M. A. Guadalupe-Alcoser, y D. F. Guerrero-Bonilla, «Obtención de dióxido de titanio a partir de arenas ferrotitaníferas ecuatorianas mediante el método del cloro», *Polo del Conocimiento: Revista Científico - Profesional*, vol. 6, n.o 5, pp. 302-316, may 2021, doi: 10.23857/pc.v6i5.2660.

[18] G. Giuffrida, R. Caponetto, and F. Nocera, "Hygrothermal properties of raw earth materials: A literature review," *Sustainability*, vol. 11, no. 19, p. 5342, 2019. [En línea]. Disponible en: https://doi.org/10.3390/su11195342

[19] E. Gazel, G. E. Alvarado, J. Obando, y A. Alfaro, «Geología y evolución magmática del Arco de Sarapiquí, Costa Rica», *Revista Geológica de América Central*, n.o 32, feb. 2006, doi: 10.15517/rgac.v0i32.4242.

[20] G. H. Floor, *Selenium Cycling in Volcanic Environments: The Role of Soils as Reactive Interfaces*, Universitat de Girona, 2011. [En línea]. Disponible en: https://tesisenred.net/handle/10803/31831#page=1 . [Accedido: 8-may-2025].

[21] J. Widmann, "Interpretación de curvas; Parte 2: Mediciones isotérmicas," *UserCom*, no. 2, METTLER TOLEDO, 2000. [En línea]. Disponible en: https://www.mt.com/mt_ext_files/Editorial/Generic/3/TA_UserCom12_0160929710242401_files/tausc12s.pdf

[22]. L. A. Solís Sánchez, *Propiedades físicas y caracterización de materiales compósitos usados en la arquitectura de tierra*, Tesis de Maestría, Posgrado en Ciencias (Física Aplicada), Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México, jul. 2024. . [En línea]. Disponible en: https://repositorioinstitucional.buap.mx/server/api/core/bitstreams/49b9a7b8-d608-4988-baf6-4bb7804d4ba4/content

[23] D. B. Tagua, B. P. Barbero y J. A. González, "Efecto de la temperatura de calcinación sobre la estructura y estabilidad de arcillas naturales de la provincia de San Luis," en *8vo. Encuentro de Jóvenes Investigadores en Ciencia y Tecnología de Materiales – JIM 2023*, Córdoba, Argentina: Universidad Tecnológica Nacional, AJEA, 7–8 sep. 2023. [En línea]. Disponible en: https://rtyc.utn.edu.ar/index.php/ajea/article/view/1523/1399

[24] L. Sánchez Muñoz, J. García Guinea, and S. López Andrés, "Caracterización estructural simple de feldespatos alcalinos: metodología de trabajo," *Bol. Soc. Esp. Ceram. Vidr.*, vol. 30, no. 2, pp. 69–79, 1991. https://hdl.handle.net/20.500.14352/57165

[25] F. Deon, F. van Ruitenbeek, H. van der Werff, M. van der Meijde, and C. Marcatelli, "Detección de minerales arcillosos de ilita/esmectita intercalados mediante análisis de difracción de rayos X (DRX), microscopio electrónico de barrido (SEM) y espectroscopia de reflectancia," *Sensores*, vol. 22, no. 9, p. 3602, May 2022, https://doi.org/10.3390/s22093602

[26] B. Hejazi, C. Luz, F. Grüner, J. Frick, and H. Garrecht, "Characterisation of Adobe and Mud–Straw for the Restoration and Rehabilitation of Persian Historical Adobe Buildings," *Materials*, vol. 17, no. 8, p. 1764, 2024. [En línea]. Disponible en: https://doi.org/10.3390/ma17081764

[27] J. Youssef, K. Bouchra, B. Larbi, B. Bouamar, F. Azzeddine, and J. Zakariae, "Characterization of Earthen Bricks Used in Ancient Constructions in the Marrakech Region, Morocco," *Civil Engineering and Architecture*, vol. 14, no. 1, pp. 613–629, 2026. [En línea]. Disponible en: https://doi.org/10.13189/cea.2026.140141

[28] A. Mellaikhafi, A. Tilioua, H. Souli, M. Garoum, and M. A. Alaoui Hamdi, "Characterization of different earthen construction materials in oasis of south-eastern Morocco (Errachidia Province)," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 14, p. e00496, 2021. [En línea]. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00496

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores aquí firmantes declaramos que no se utilizó ninguna herramienta de IA para la conceptualización, traducción o redacción de este artículo.

Qanela: A framework proposal for designing portable quantum assembly languages across different quantum computing platforms

Qanela: Propuesta de un marco para el diseño de lenguajes ensamblado cuánticos portátiles a través de diferentes plataformas de computación cuántica

Isaac Arturo Vargas-Chacón[1], Johan Carvajal-Godínez[2], Ernesto Rivera-Alvarado[3]

Fecha de recepción: 11 de diciembre, 2025
Fecha de aprobación: 24 de abril, 2026

Vargas-Chacón, I.A; Carvajal-Godínez, J; Rivera-Alvarado, E. Qanela: a framework proposal for designing portable quantum assembly languages across different quantum computing platforms. *Tecnología en Marcha*. Vol. 39 Nº 4. Octubre-Diciembre, 2026. Pág. 160-175.

https://doi.org/10.18845/tm.v39i4.8384

1 Instituto Tecnológico de Costa Rica, Master's in Computer Science, Costa Rica
i.vargas.1@estudiantec.cr
https://orcid.org/0009-0006-7264-2020
2 Instituto Tecnológico de Costa Rica, Electronic Engineering School, Costa Rica
johcarvajal@itcr.ac.cr
https://orcid.org/0000-0003-1489-7894
3 Instituto Tecnológico de Costa Rica, Computer Science School, Costa Rica
errivera@itcr.ac.cr
https://orcid.org/0000-0002-2756-0572

Keywords

Quantum computing; quantum assembly languages; algorithm portability; cross-platform compatibility; quantum software engineering; hardware abstraction; quantum circuit compilation

Abstract

The diversity of quantum hardware platforms creates significant algorithm portability challenges, with each platform employing distinct instruction sets, gate implementations, and physical constraints that hinder software reusability. This paper presents a framework for designing portable quantum assembly languages enabling seamless cross-platform execution. Through systematic profiling of Shor's, Grover's, and QAOA algorithms on IBM Qiskit, Microsoft Q#, and Google Cirq — 3,216 executions of identical, reference-validated logical circuits — we identify key portability challenges and derive empirically grounded design criteria from execution-pattern analysis. With matched workloads, cross-platform circuit-depth divergence is 1.3–1.6× where no gate decomposition is required and rises to 94.8× under multi-controlled decomposition pressure, of which 3.36× is genuine same-level synthesis divergence and the remainder an abstraction-level measurement gap; optimization semantics, topology expressibility, and quantum–classical execution contracts diverge analogously. The framework balances hardware abstraction with performance optimization through declared abstraction levels, topology-aware compilation, optimization profiles with defined semantics, and a universal gate set with platform-specific decomposition. Prototype validation demonstrates 100% automated compilation of unmodified single-source programs across 30 platform configurations, with all 90 executions passing calibrated distributional acceptance gates and exact statevector fidelity of 1.000000 against the language's reference semantics, providing feasibility evidence for vendor-independent quantum software development.

Palabras clave

Computación cuántica; lenguajes ensamblador cuánticos; portabilidad de algoritmos; compatibilidad entre plataformas; ingenería de software cuántico; abstracción del hardware; compilación de circuitos cuánticos.

Resumen

La diversidad de plataformas de hardware cuántico plantea desafíos significativos de portabilidad de algoritmos, ya que cada plataforma emplea conjuntos de instrucciones, implementaciones de compuertas y restricciones físicas distintas que dificultan la reutilización del software. Este trabajo presenta un marco para el diseño de lenguajes ensambladores cuánticos portables que permiten la ejecución transparente entre plataformas. Mediante la caracterización sistemática de los algoritmos de Shor, Grover y QAOA en IBM Qiskit, Microsoft Q# y Google Cirq (3216 ejecuciones de circuitos lógicos idénticos y validados contra una referencia), se identifican los principales desafíos de portabilidad y se derivan criterios de diseño con fundamento empírico a partir del análisis de patrones de ejecución. Con cargas de trabajo equivalentes, la divergencia en la profundidad de circuito entre plataformas es de 1.3–1.6× cuando no se requiere descomposición de compuertas y asciende a 94.8× bajo presión de descomposición de compuertas multicontroladas. De este factor, 3.36× corresponde a una divergencia genuina de síntesis al mismo nivel de abstracción, y el resto se debe a una brecha de medición entre niveles de abstracción. La semántica de optimización, la expresividad de la topología y los contratos de ejecución cuántico-clásicos divergen de manera análoga. El marco equilibra la abstracción del hardware con la optimización del rendimiento mediante niveles de

abstracción declarados, compilación consciente de la topología, perfiles de optimización con semántica definida y un conjunto universal de compuertas con descomposición específica para cada plataforma. La validación del prototipo demuestra la compilación automatizada del 100 % de los programas de fuente única sin modificar en 30 configuraciones de plataforma. Las 90 ejecuciones superan criterios de aceptación distribucionales calibrados y alcanzan una fidelidad exacta del vector de estado de 1.000000 respecto de la semántica de referencia del lenguaje. Esto aporta evidencia de viabilidad para el desarrollo de software cuántico independiente del proveedor.

Introduction

Quantum computing represents a paradigm shift in computational technology, leveraging quantum mechanics principles (superposition, entanglement, interference) to perform certain computations exponentially faster than classical approaches [1, 2, 3]. Applications span molecular simulation [4, 5], materials science, and optimization with potential impacts in pharmaceutical research and chemical engineering [6]. However, hardware development remains experimental with diverse qubit technologies (superconducting, trapped ions, photonic) [7, 8], creating isolated ecosystems where software for one platform cannot easily run on another [9, 10].

The portability of quantum algorithms across different quantum computing hardware has become a major challenge in the field [10]. Different qubit technologies exhibit varying physical properties that make them well-suited for implementing certain quantum gates while rendering others practically impossible [7, 11]. These hardware-dependent limitations result in platform-specific instruction sets that vary significantly between quantum computers [12], each accompanied by proprietary tools, programming frameworks, and gate implementations [13]. This isolation is magnified by hardware roadmaps driven by private companies whose strategies naturally align with business objectives rather than purely scientific priorities [14]. Consequently, quantum software developers write algorithms locked to specific platforms and vendors, hampering code reusability and scalability.

The quantum software community urgently needs methodologies to address these portability challenges [15]. This requires a paradigm shift from hardware-centric programming to software-centric design, where quantum assembly languages provide sufficient abstraction to enable algorithm portability while maintaining performance optimization opportunities—and where software can guide the direction of hardware development rather than merely follow it.

This paper addresses the fundamental question: *How can quantum algorithms be made portable across different quantum computing hardware platforms?* We propose a framework for designing quantum assembly languages that balances abstraction and performance, enabling seamless execution of quantum algorithms across diverse hardware architectures. Our framework is grounded in systematic profiling of quantum algorithm execution patterns across major platforms (IBM Qiskit, Microsoft Q#, and Google Cirq), in which every compared execution is validated for semantic equivalence against an independent reference simulator, and synthesizes design criteria that promote portability without sacrificing efficiency.

Related work

Existing quantum programming approaches span high-level frameworks (quAPL [16], OpenQL [17], Qwerty [18], Qunity [19], QHAL [10]) and assembly languages (OpenQASM [20, 21], cQASM [22], Jaqal [23, 24], MLIR quantum dialect [25]). Tools like qprof [26] enable

performance analysis. However, current approaches face fundamental tensions: frameworks prioritize either abstraction or hardware control but rarely achieve optimal balance [9], and lack empirical optimization profiles for algorithm-specific compilation strategies.

Framework Differentiation and Novel Contributions

Table 1. Framework differentiation and our contributions.

Existing approach	Key Limitation	Our Solution
QIR/MLIR	Hardware-agnostic IR lacks algorithm-specific compilation strategies	Topology-aware algorithm classification (interaction-graph density + decomposition pressure) with automatic connectivity adaptation
QHAL	Hierarchical abstraction without empirical optimization profiles	Evidence-based design criteria from 3,216 reference-validated cross-platform experimental runs
OpenQASM 3	Timing/classical primitives without topology requirements	@requires_connectivity directives with automatic platform-specific decomposition

Table 1 summarizes how our framework addresses critical limitations in existing portability approaches: QIR/MLIR [25] lacks algorithm-specific compilation strategies, QHAL [10] lacks empirical grounding in actual platform behavior, and OpenQASM 3 [21] provides no mechanism for expressing topology requirements. Our topology-aware classification, evidence-based design criteria (derived from 3,216 individually reference-validated measurements), and **@requires_connectivity** directives target these gaps directly, addressing the fundamental tension between abstraction and performance that has constrained prior portability efforts [9].

Novel Technical Contributions:

1. Empirically grounded design criteria: Design criteria derived from systematic profiling of actual algorithm executions—every execution validated for semantic equivalence against an independent reference—rather than theoretical assumptions.
2. Two-axis, IR-level algorithm classification: Automatic categorization by interaction-graph density (topology sensitivity) and multi-controlled decomposition pressure, computed on the platform-independent IR where the classification is unique, with appropriate compilation pathways.
3. Platform philosophy abstraction: Optimization profiles with *defined semantics* (educational, hardware-realistic, language-integrated), recognizing that performance differences reflect optimization philosophy and that "stronger optimization" is not a portable concept.
4. Declared-abstraction-level measurement methodology: Cross-platform structural metrics are defined only at a declared abstraction level, preventing category errors when platforms natively compile at different levels.

5. Reference-gated evaluation protocol: A per-run acceptance procedure (Monte-Carlo-calibrated distributional gates plus algorithm certificates against an independent reference simulator) ensuring that all cross-platform comparisons are made between semantically equivalent circuits.

Methodology

This research adopts a design science approach to develop a framework for portable quantum assembly languages. The methodology comprises four interconnected phases: (1) quantum algorithm profiling, (2) execution pattern analysis, (3) framework synthesis, and (4) prototype development and validation.

Quantum Algorithm Profiling

Three canonical quantum algorithms were profiled across IBM Qiskit, Microsoft Q#, and Google Cirq platforms: Shor's algorithm [1] (N=15 factorization with real controlled modular exponentiation and explicit inverse QFT), Grover's algorithm [1, 13] (n=3,5,8 qubit search), and QAOA [2] (n=6,8,12 qubit MaxCut with p=1,2 layers over two seeded random graphs per size). These algorithms represent diverse computational paradigms: period-finding with quantum Fourier transforms (Shor), amplitude amplification (Grover), and hybrid quantum-classical optimization (QAOA) [13].

Canonical instances (single source of truth). Each of the 16 instances is defined once as a canonical gate list over the universal vocabulary {h, x, rx, rz, cx, cz, cp, swap, cswap, mcz}; every platform builds its circuit from the same list, making the compared workloads identical by construction. Grover iteration counts are fixed and identical on every platform (k = 2, 4, 12 for n = 3, 5, 8, i.e., the optimal counts). QAOA graphs are connected G(n, 0.5) instances generated from recorded seeds and shared across platforms ($\beta = 0.5$, $\gamma = 1.0$; cost layer CX·RZ(2γ)·CX per edge; mixer RX(2β)). Shor (N = 15, a = 7; 12 qubits: 8 counting + 4 work) implements controlled multiplication by 7 and by 4 as explicit permutation circuits, with higher controls acting as the identity since $7^4 \equiv 1 \bmod 15$, followed by an explicit inverse QFT.

Independent reference simulator. Ground truth is established by a NumPy statevector simulator sharing no code with any backend. Self-verification before use: the QFT construction equals the DFT matrix to 3.8×10^{-15}; the Shor instance's exact distribution is four peaks 0, 64, 128, 192 at probability 0.25 each; Grover success probabilities match the closed form $\sin^2((2k+1)\theta)$ to 10^{-9}.

Platform Configurations:

- Qiskit 2.5.0 (Aer 0.17.2): 3 topologies (unrestricted; grid_5×5, 25 nodes/40 edges; linear_16, 16 nodes/15 edges) × 2 optimization levels (0, 3), basis {rz, sx, x, cx}; 30 seeded replications per configuration (seed = base + replication index).
- Cirq 1.7.0: native decomposition to ≤2-qubit operations; the same 3 topologies via RouteCQC routing × 2 study-defined optimization levels—*minimal* (no transformers) and *full* (a documented five-transformer chain: drop_negligible_operations → merge_single_qubit_gates_to_phxz → eject_z → drop_empty_moments → align_left), a design decision because the platform exposes no built-in levels. A determinism pilot (5 replications × 3 conditions) produced bit-identical outputs, fixing the replication count at 3.

- Q# 1.29.1: single configuration. The QDK exposes no coupling-map and no optimization-level interface; this absence is recorded as a finding rather than padded with placeholder measurements. 3 replications (structural determinism verified); the shot loop is internal to the generated program (a single seeded execution), which is required for correct sampling semantics (Section 4.1.5).

Acceptance procedure (applied to every run). 4,096 shots per execution. A run's measured distribution must satisfy: total-variation distance to the exact reference ≤ a Monte-Carlo-calibrated gate (mean + 6σ of the multinomial sampling TVD at 4,096 shots, estimated from 200 draws per instance), plus algorithm certificates—Grover: $|\hat{P}(\text{marked}) - P_{\text{exact}}| \leq 6\sigma$; QAOA: $|\langle \hat{C} \rangle - \langle C \rangle_{\text{exact}}| \leq 6\sigma$; Shor: all four peaks within [0.20, 0.30]. Runs failing any gate are recorded as failures and contribute no metrics. All 3,216 runs passed.

Collected Metrics: uniform ASAP circuit depth (identical algorithm applied to every platform's emitted operation list; measurements excluded), gate frequencies and counts by arity, two-qubit gate ratio, ancilla allocation, logical and physical interaction graphs, inserted routing SWAPs, compilation and execution times, and full measurement distributions.

Experimental design and measurement protocol

Our experimental design distinguishes between *deterministic platform outputs* and *stochastic platform outputs*, with the distinction established empirically rather than assumed: a pilot verified Cirq's compilation pipeline to be bit-deterministic across replications; Q# outputs are structurally deterministic; and Qiskit's transpiler is deterministic in the absence of a coupling map (depth coefficient of variation 0.000 across 30 seeds) and stochastic under one (Section 4.1.4), localizing its randomness to layout/routing.

Table 2. Experimental design matrix.

Platform	Instances	Configurations per instance	Replications	Runs
Qiskit	16	3 topologies × 2 opt. levels = 6	30 (seeded)	2,880
Cirq	16	3 topologies × 2 opt. levels = 6	3 (pilot-verified deterministic)	288
Q#	16	1 (no topology/ optimization axes)	3 (deterministic)	48
Total				3,216

The asymmetric replication in Table 2 is methodologically appropriate rather than imbalanced: deterministic phenomena require no repeated sampling, while stochastic optimization demands statistical characterization. Q#'s single configuration per instance is a measured property of the platform—there is nothing to sweep, and that absence is itself evidence (Criterion 2). Seeds are deterministic functions of the replication index and are recorded with every run.

Analysis approach:

1. **Deterministic results** (Cirq, Q#, and Qiskit without coupling maps): reported as exact values.
2. **Stochastic results** (Qiskit under coupling maps): reported as mean ± standard deviation across 30 seeded runs; variability reflects transpilation randomness, not measurement noise.
3. **Cross-platform ratios** are computed only between semantically validated runs of identical logical circuits, and structural ratios are additionally restricted to a **declared abstraction level** (Section 3.3).

Execution Pattern Analysis

We characterize how one logical algorithm unfolds into platform-specific execution patterns. Figure 1 illustrates the pipeline outcome for Grover n=3: a single canonical IR lowered into three different native realizations, all semantically validated against the reference.

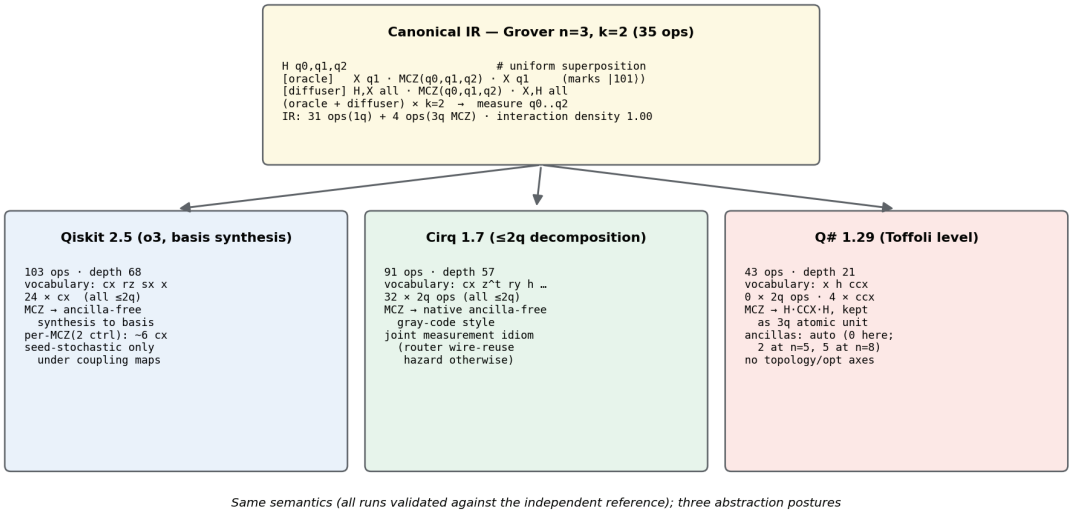


Figure 1. Execution pattern example (Grover's algorithm, n=3, k=2). The canonical IR (top) is identical for all platforms. Qiskit synthesizes the multi-controlled-Z into its hardware basis (103 ops, all ≤2-qubit); Cirq decomposes it ancilla-free to ≤2-qubit gates (91 ops); Q# realizes it at the Toffoli level (43 ops, zero 2-qubit gates), auto-allocating ancillas at larger sizes. All three preserve the algorithm's semantics.

The three lowerings expose the study's central structural fact: the platforms natively compile at **three different abstraction levels**—hardware-basis synthesis (Qiskit), ≤2-qubit decomposition (Cirq), and Toffoli-level realization with automatic ancilla allocation (Q#). Structural metrics are therefore comparable only at a declared level; the level of record for cross-platform ratios is the ≤2-qubit level, with Q#'s metrics reported at its native level under an explicit tag.

Vocabulary divergence. Aggregating emitted gate vocabularies across the campaign, pairwise Jaccard overlaps are given in Table 3: no pair of platforms speaks a similar dialect. The native gate-frequency fingerprints make each posture concrete: Qiskit emits its hardware basis {cx, rz, sx, x}; Cirq a ≤2-qubit vocabulary including PhasedXZ and named SWAPs; Q# emits {x, h, ccx} for Grover—zero two-qubit gates, a direct signature of Toffoli-level compilation.

Table 3. Emitted gate-vocabulary overlap (Jaccard) across the full campaign.

Platform	Qiskit	Cirq	Q#
Qiskit	1.00	0.12	0.38
Cirq	0.12	1.00	0.31
Q#	0.38	0.31	1.00

Framework Synthesis

Based on insights from algorithm profiling and pattern analysis, we synthesized design criteria for portable quantum assembly languages through a systematic evidence-to-criteria mapping: performance variance decomposition led to multi-level abstraction support with declared measurement levels; topology expressibility analysis informed topology-aware compilation requirements; gate set heterogeneity motivated universal gate set specifications with platform-owned decomposition; optimization philosophy divergence necessitated optimization profiles with defined semantics; IR-level classification findings motivated two-axis classification and routing; and quantum–classical boundary hazards motivated standardized hybrid execution primitives. Each criterion is presented with its supporting evidence in Section 4, and the criteria were formalized into a framework specification defining syntax, semantics, and compilation strategies.

Results and Discussion

Algorithm Profiling Results

Profiling identical, reference-validated logical circuits across the three platforms revealed large, *structured* variations in execution cost.

Cross-Platform Performance Analysis

Central finding: depth divergence is a decomposition-posture phenomenon (1.3× to 94.8×; Table 4).

Table 4. Circuit depth by platform (unrestricted topology, strongest optimization). Every platform executes the same canonical gate list with identical Grover iteration counts, so all ratios measure compilation, decomposition, and routing infrastructure—never differing amounts of algorithmic logic.

Instance	Qiskit (mean ± sd, 30 seeds)	Cirq	Q# (native level)	max/min
grover-n3 (k=2)	68 ± 0	57	21	3.2×
grover-n5 (k=4)	604 ± 0	1,185	49	24.2×
grover-n8 (k=12)	6,797 ± 0	22,849	241	94.8×
qaoa-n6 (4 instances)	23–52	23–56	17–42	1.3–1.4×
qaoa-n8 (4 instances)	35–67	39–76	29–57	1.3×
qaoa-n12 (4 instances)	56–94	67–112	50–84	1.3×
shor-N15-a7	108 ± 0	102	69	1.6×

Where the canonical circuit body is already native 1–2-qubit (QAOA), the platforms nearly agree (1.3–1.6×)—a negative control demonstrating that the large divergences elsewhere are structure, not platform noise. Divergence concentrates exactly where multi-controlled decomposition pressure exists and scales with the control count of Grover's MCZ (3.2× → 24.2× → 94.8×).

Decomposing the 94.8×. The headline ratio has three separable components:

1. Same-level synthesis divergence (Qiskit vs Cirq, both emitting exclusively ≤2-qubit gates): up to 3.36× at grover-n8, with workload-dependent direction—Cirq is *shallower* at grover-n3 (0.84×) and shor (0.94×). Neither ancilla-free synthesis strategy dominates. Per multi-controlled-Z with 7 controls, Qiskit synthesizes ≈180 CX and Cirq ≈548 CX, both without ancillas.
2. Abstraction-level gap (the remainder): Q#'s Grover trace contains zero two-qubit gates—the QDK realizes the MCZ at the Toffoli level (11 CCX per 7-control MCZ) and auto-allocates ancillas (0, 2, 5 for n = 3, 5, 8; 264 >2-qubit operations at n=8 over 13 traced qubits). Its depth of 241 is measured in a different unit than Qiskit's 6,797; treating the resulting ratio as an efficiency comparison is a category error, not a noisy measurement. This component motivates the declared-level measurement rule and Criterion 1.
3. Near-parity without pressure (1.3×): the baseline against which the above are interpreted.

Topology Sensitivity

Table 5. Depth inflation under connectivity constraints (linear_16 / unrestricted, strongest optimization)

Instance class	Qiskit	Cirq	Q#
grover (n=3/5/8)	1.57× / 1.48× / 2.29×	1.00× / 1.07× / 1.20×	no topology interface
qaoa-n6 (4 inst.)	1.56–2.16×	1.20–1.43×	no topology interface
qaoa-n8 (4 inst.)	1.84–2.34×	1.28–1.45×	no topology interface
qaoa-n12 (4 inst.)	2.41–3.20×	1.41–1.54×	no topology interface
shor-N15-a7	1.88×	1.35×	no topology interface
Median	2.13×	1.38×	—

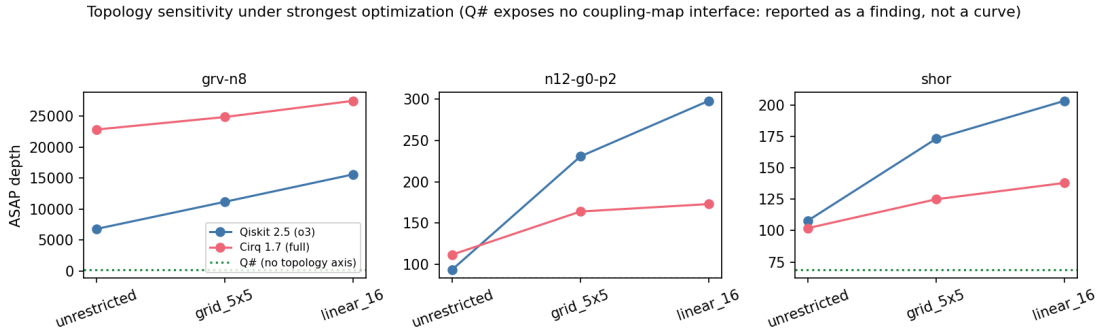


Figure 2. Topology sensitivity under strongest optimization for three representative instances. Q# exposes no coupling-map interface; its value is a level-tagged constant, not a curve.

Two findings deserve emphasis (Table 5, Figure 2). First, one major platform cannot receive topology intent at all: across all 16 instances, the QDK exposes no coupling-map abstraction, so a portable language must carry the directive—per-platform flags cannot. Second, routing-cost *observability* itself diverges: for qaoa-n12-g0-p2, Cirq reports 144 explicitly named inserted

SWAPs on linear_16 (two-qubit ops 140 → 284), while Qiskit at optimization level 3 absorbs routing into basis-gate inflation (CX 140 → 431, zero named SWAPs). A normalized routing-cost report is therefore part of the framework's compilation contract.

Classification must run on the IR. Platform-emitted two-qubit gate ratios are fingerprints of the compiler, not the algorithm: for the same Grover instance the emitted ratio is 0.37 (Qiskit), 0.35 (Cirq), and 0.00 (Q#). Even on the IR, naive arity counting fails (Grover's IR contains no arity-2 gates at all; its MCZ touches all qubits). The portable invariant is the interaction-graph density of the IR—which pairs of qubits must ever interact, with k-qubit operations contributing k-cliques (Table 6).

Table 6. IR-level connectivity demand (platform-independent).

Algorithm	Interaction-graph density	Multi-controlled arity (decomposition pressure)
Grover (all n)	1.00 (every pair)	n (high)
Shor N=15	0.62	3 (moderate: cswap)
QAOA (n=8 example)	0.57	— (none)

Measured correctly, Grover demands the *highest* connectivity—while simultaneously being the most platform-divergent workload due to decomposition pressure. The two axes (topology sensitivity; decomposition pressure) dissociate empirically—QAOA n=12 tops topology inflation (up to 3.20× on Qiskit) with near-parity across platforms, while Grover n=8 tops cross-platform divergence with mild topology inflation on Cirq (1.20×)—and both are computed on the IR in the framework's classification stage.

Optimization Profiles Are Not Portable

lcc Instance & Qiskit o0 → o3 & Cirq minimal → full (study-defined chain) grover n=3/5/8 & +30 qaoa (12 instances) & +9 shor-N15-a7 & +45

"Stronger optimization" is not a portable concept (Table 7): Qiskit's built-in levels behave as expected (+11).

Transpiler Stochasticity Is Localized to Routing

Table 8. Qiskit depth coefficient of variation across 30 seeds (optimization level 3).

Topology	CV median	CV max
unrestricted	0.000	0.000
grid_5×5	0.080	0.139
linear_16	0.041	0.068

Without a coupling map, Qiskit's transpiler is bit-deterministic; under one, layout/routing sampling introduces up to 13.9% depth variation across seeds (Table 8). This within-platform spread is itself a portability datum: reproducible cross-platform claims require seed policies and replication, which the framework's execution contract mandates. Cirq's pipeline and Q# are bit-deterministic across replications (96/96 and 16/16 cells).

Quantum–Classical Boundary Hazards

Two reproducible portability hazards were discovered at the measurement/shot layer, precisely because every run was gated on the reference:

1. Cirq — measurement floating and wire reuse. Per-qubit measurements float in the routing DAG to each wire's last dependency; **RouteCQC** then routes later SWAPs *through already-measured wires* (observed: two measurement keys on one physical qubit), breaking terminal-state sampling although recorded results remain correct. The required idiom is a single joint measurement over the measured register, which depends on every wire and cannot float (validated terminal in 96/96 configurations).
2. Q# — per-shot re-seeding. Host-side **set_quantum_seed** combined with host-driven shots re-seeds every shot, collapsing 4,096 shots into one repeated sample (diagnostic signature: Grover's TVD equal to exactly 1 - P(marked)). The conforming lowering places the shot loop *inside* the generated program as a single seeded execution.

Together with three incompatible result representations (classical bits + counts, keyed arrays, **Result[]**), these hazards establish measurement placement, shot semantics, and seed contracts as first-class portability surfaces (Criterion 7).

Semantic Validation and Runtime

All 3,216 runs passed the acceptance procedure (Figure 3; TVD medians: Qiskit 0.0659, Cirq 0.0656, Q# 0.0721; upper tails are dominated by the QAOA n=12 sampling floor—4,096 outcomes at 4,096 shots—and remain below their calibrated gates). Shor's four-peak certificate passed on every platform × topology × level combination.

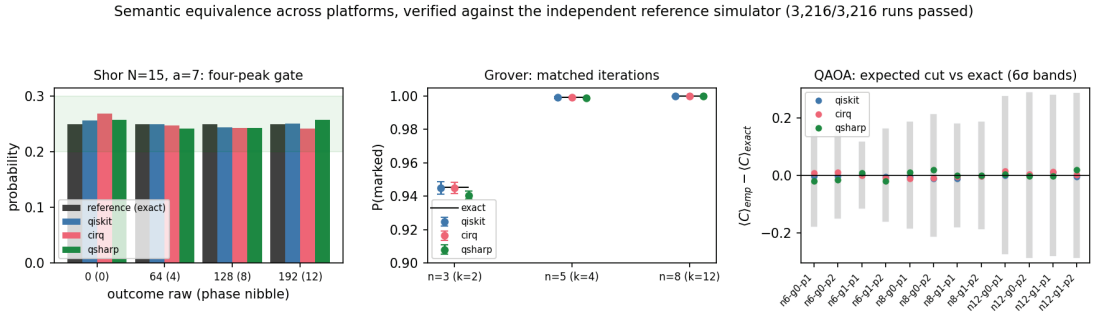


Figure 3. Semantic equivalence across platforms verified against the independent reference: Shor's four peaks within the acceptance window on all platforms; Grover P(marked) at the closed-form values; QAOA expected cut within 6σ bands. 3,216/3,216 runs passed.

Median per-run compile/execute times (strongest constrained configuration): Qiskit 15 ms / 12 ms; Cirq 37 ms / 20 ms; Q# 137 ms / 2.0 s (maximum 46.2 s at qaoa-n12; the in-program shot loop trades throughput for reproducible sampling semantics).

Framework Design Results

Based on the empirical findings, we developed seven evidence-based design criteria for portable quantum assembly languages.

Design Criteria Summary

Framework Architecture

Our framework implements a multi-stage compilation pipeline (Figure 4).

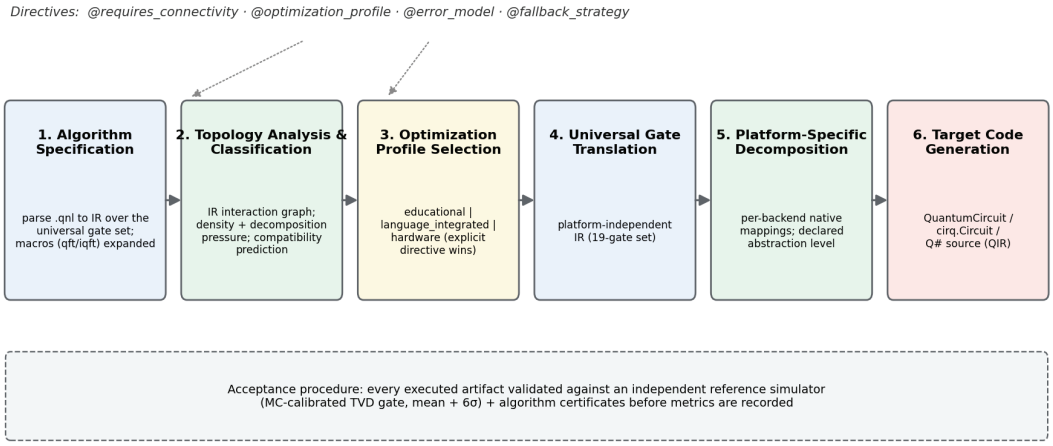


Figure 4. Framework architecture: from algorithm specification to hardware-specific code generation, with the reference-gated acceptance procedure as the evaluation backbone.

Framework Formalization

Interoperability and Backend Targets Portable assembly programs can be transpiled into OpenQASM 3 (for IBM Qiskit and other OpenQASM-compatible platforms) or Quantum Intermediate Representation (QIR) backends (for Microsoft Azure Quantum and LLVM-based toolchains), ensuring execution on a wide range of quantum hardware without vendor lock-in while preserving platform-specific optimizations through the directive system.

Semantic Definitions We define the following metrics for framework evaluation:

- Compilation Success (custom quantum-specific metric): binary; success indicates the algorithm compiles without topology violations, resource conflicts, or syntax errors.
- Performance Overhead (standard metric [27]): relative increase in execution cost versus a native, idiomatic, hand-written implementation under identical settings, $(c_{framework} - c_{native})/c_{native} \times 100\%$. Where framework lowering and the native baseline share identical gate sequences by construction, overhead is reported as lossless lowering (parity by construction); measured overhead is reported only for genuinely independent baselines.
- Total Efficiency Ratio (*novel contribution*): composite metric combining circuit depth and gate count ratios, $(depth_{platform}/depth_{baseline}) \times (gates_{platform}/gates_{baseline})$, computed only at a declared abstraction level.
- Statistical Fidelity (calibrated acceptance procedure): every executed artifact is validated against the exact reference distribution of the IR computed by an independent reference simulator—TVD ≤ a Monte-Carlo-calibrated sampling gate (mean + 6σ at the declared shot count) plus algorithm certificates—with Hellinger fidelity [28] reported alongside. Reported fidelities are never clipped or renormalized; values exceeding 1.0 are non-conforming by definition.

Syntax Extension Specification

Listing 1 presents three key syntax features derived from the empirical findings: (1) **@algorithm** directives specify topology requirements and fallback strategies (addressing depth inflation of up to 3.2× under linear connectivity and the complete absence of a topology interface on one platform); (2) **UNIVERSAL_GATE** definitions provide platform-agnostic gate abstractions with explicit native mappings (resolving the Jaccard 0.12–0.38 vocabulary disjointness and up to 3.36× same-level synthesis divergence); and (3) **@optimization_profile** declarations select compilation strategies with defined semantics, in light of the opposite-signed optimization effects observed across platforms.

Listing 1. Topology awareness, universal gates, and optimization profiles

```
@algorithm Shor {
  @requires_connectivity: all_to_all
  @optimization_target: depth_minimal
  @fallback_strategy: decompose_qft
}
// Universal gate abstraction with platform mapping
UNIVERSAL_GATE cnot(q1, q2) {
  qiskit: cx q1, q2;       // Maps to CX gate
  cirq: CNOT(q1, q2);      // Maps to CNOT operation
  qsharp: CNOT(q1, q2);    // Maps to controlled operation
}
// Configurable optimization profiles (semantics-defined)
@optimization_profile educational {
  preserve: circuit_structure     // no rebasing
  target: simulation_clarity
}
@optimization_profile hardware {
  minimize: depth_at_declared_level
  target: device_fidelity
  consider: topology_constraints
}
```

Prototype Validation Study

We conducted a prototype validation study to assess the feasibility of the framework approach using the same algorithm portfolio as the profiling study, compiled from unmodified single-source portable assembly programs.

Compilation and adaptation. All 30 platform configurations (spanning the three platforms, the topology and optimization axes where each platform exposes them, and the full instance portfolio) compiled from the same unmodified source with 100% automated adaptation—no per-platform edits of any kind.

Semantic preservation. All 90 framework-compiled executions passed the calibrated distributional acceptance gates of Section 3. In addition, exact statevector comparison between framework-compiled artifacts and the language's reference semantics yielded fidelity 1.000000 across all

30 artifacts (maximum deviation $\approx 5.8 \times 10^{-13}$, at numerical precision), demonstrating that the abstraction layer—topology-aware routing, universal gate decomposition, and platform-specific lowering—preserves quantum circuit semantics exactly.

Overhead disclosure. For the majority of cases, framework lowering produces gate sequences identical to the idiomatic native construction; per the semantic definitions, these are reported as lossless lowering (parity by construction). Measured overhead is reported only where the native baseline is genuinely independent, and sampling-floor effects (e.g., QAOA n=12, whose ideal-sampler fidelity ceiling was measured empirically with bootstrap confidence intervals) are accounted for by the calibrated gates rather than by renormalizing fidelity values.

Topology prediction. The compile-time compatibility predictor (interaction-graph embedding against the target coupling graph) correctly identified every directly embeddable case and every case requiring a fallback strategy across the validation portfolio.

Threats to Validity

Internal validity. Strengths: identical-by-construction workloads; per-run semantic gating against an independent reference (3,216/3,216 passed); empirically established determinism/stochasticity with seed policies; uniform depth metric and declared-level rule. Limitations: simulation-only environment; limited algorithm coverage (Grover/QAOA/Shor); platform-version-specific results (Qiskit 2.5.0, qiskit-aer 0.17.2, Cirq 1.7.0, Q# 1.29.1; Python 3.12.3). The simulation-only setting is deliberate: ideal, noiseless simulators isolate the software impact of each platform's compilation pipeline by removing the stochastic noise of physical hardware, so the measured divergence reflects the pure overhead of compilation posture and framework lowering, and they make exact per-run semantic gating against the reference possible; the cost is that hardware noise is not modeled, Criterion 6 is not exercised empirically, and validation on physical QPUs remains future work.

External validity. Small-scale circuits (3–13 qubits including ancillas) may not generalize to larger quantum systems, and the limited topology diversity (linear/grid) may not represent the full hardware connectivity spectrum. Cirq's *full* level is one documented transformer composition, not the platform's only or best possibility—conclusions concern the portability of the optimization *concept*, not any platform's achievable optimum.

Construct validity. Circuit-level metrics (depth, gate count) may not capture non-uniform gate execution times on real hardware, and simulator-based distributional validation does not reflect decoherence effects in physical devices. Cross-level structural comparisons are avoided by construction (declared-level rule) rather than corrected post hoc.

Discussion

The profiling campaign shows that cross-platform performance differences are structured by compilation posture rather than hardware limits: platforms nearly agree where no decomposition is required, diverge by measurable synthesis strategy at a common level, and become incomparable across abstraction levels—with topology expressibility, optimization semantics, and quantum–classical execution contracts diverging analogously. The framework operationalizes these findings—declared abstraction levels, language-level topology directives, semantics-defined optimization profiles, IR-level two-axis classification, and normative execution contracts—addressing the "peeling off vs. piling on" debate [9] through selective abstraction traversal, and prototype validation confirms feasibility (100% single-source compilation; 90/90 gated executions; fidelity 1.000000).

Conclusion

This research demonstrates that portable quantum assembly languages are both feasible and practical, offering a pathway toward vendor-independent quantum software development. Our systematic profiling of 3,216 reference-validated executions revealed that cross-platform performance differences are large but causally structured: with identical logical circuits and matched iteration counts, depth divergence is 1.3–1.6× where no gate decomposition is required, rises to 3.36× from synthesis strategy alone at a common ≤2-qubit level, and reaches an apparent 94.8× only when measurements at different abstraction levels are mixed—a category error the framework prevents by requiring declared measurement levels. These findings support our central thesis that current performance differences reflect design philosophy rather than fundamental hardware limitations, and that quantum software development should guide hardware evolution rather than being constrained by it.

The seven design criteria derived from this empirical analysis provide a comprehensive foundation for developing portable quantum assembly languages. In the prototype evaluation on simulators for three canonical algorithms across Qiskit, Cirq, and Q#, the resulting framework achieves 100% automated compilation of unmodified single-source programs across 30 configurations, with all 90 executions passing calibrated distributional gates and exact statevector fidelity of 1.000000 against the language's reference semantics. The framework's ability to classify algorithms on the platform-independent IR, detect topology requirements, select semantics-defined optimization profiles, and generate platform-specific implementations while preserving algorithmic semantics exactly—together with its normative quantum–classical execution contracts—addresses the most significant, empirically demonstrated barriers to quantum algorithm portability.

Future research directions include empirical noise-model comparison to exercise the error-model abstraction criterion, extending the framework to additional quantum computing paradigms, deepening integration with quantum error correction protocols, developing automated optimization strategies that leverage platform-specific features, and conducting large-scale evaluations across diverse algorithms and emerging hardware platforms. Community engagement and standardization efforts will be essential to achieving widespread adoption.

Data and Code Availability

All experimental data, framework implementation, circuit code, analysis scripts, and reproducibility documentation—including the canonical instance definitions, the independent reference simulator, the complete 3,216-run dataset with per-run validation records, configuration matrices with recorded seeds, and the framework compiler toolchain with platform adapters—are available under MIT License at https://gitlab.com/isaacvargas_TEC_CR/qanela. Dataset DOI: to be assigned.

References

[1] M. Ying, *Foundations of Quantum Programming*, 2nd ed. Morgan Kaufmann, 2024.

[2] J. Preskill, "Quantum computing in the NISQ era and beyond," *Quantum*, vol. 2, p. 79, 2018.

[3] A. Aspuru-Guzik, A. D. Dutoi, P. J. Love, and M. Head-Gordon, "Simulated quantum computation of molecular energies," *Science*, vol. 309, no. 5741, pp. 1704–1707, 2005.

[4] M. Reiher *et al.*, "Elucidating reaction mechanisms on quantum computers," *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, vol. 114, no. 29, pp. 7555–7560, 2017.

[5] A. Perdomo-Ortiz, N. Dickson, M. Drew-Brook, G. Rose, and A. Aspuru-Guzik, "Finding low-energy conformations of lattice protein models by quantum annealing," *Sci. Rep.*, vol. 2, p. 571, 2012.

[6] Y. Cao *et al.*, "Quantum chemistry in the age of quantum computing," *Chem. Rev.*, vol. 119, no. 19, pp. 10856–10915, 2019.

[7] M. Kjaergaard *et al.*, "Superconducting qubits: Current state of play," *Annu. Rev. Condens. Matter Phys.*, vol. 11, pp. 369–395, 2020.

[8] T. Rudolph, "Why I am optimistic about the silicon-photonic route to quantum computing," *APL Photonics*, vol. 2, no. 3, p. 030901, 2017.

[9] M. Schönberger, M. Franz, S. Scherzinger, and W. Mauerer, "Peel | pile? Cross-framework portability of quantum software," *arXiv preprint arXiv:2203.06289*, 2022.

[10] K. M. Barnes *et al.*, "Optimising the quantum/classical interface for efficiency and portability with a multi-level hardware abstraction layer for quantum computers," *EPJ Quantum Technol.*, vol. 10, p. 36, 2023.

[11] J. I. Cirac and P. Zoller, "Goals and opportunities in quantum simulation," *Nat. Phys.*, vol. 8, pp. 264–266, 2012.

[12] S. Lopez Alarcón, E. Wong, T. S. Humble, and E. Dumitrescu, "Quantum programming paradigms and description languages," *Computing in Science & Engineering*, vol. 25, no. 6, pp. 33–38, 2023.

[13] R. Lipton and K. Regan, *Introduction to Quantum Algorithms via Linear Algebra*, 2nd ed. MIT Press, 2021.

[14] D. Castelvecchi, "Quantum computers ready to leap out of the lab in 2017," *Nature*, vol. 541, no. 7635, pp. 9–10, 2017.

[15] J. Zhao, "Quantum software engineering: Landscapes and horizons," *arXiv preprint arXiv:2007.07047*, 2021.

[16] S. Núñez-Corrales, M. Frenkel, and B. Abreu, "quAPL: Modeling quantum computation in an array programming language," in *Proc. IEEE Int. Conf. Quantum Computing and Engineering (QCE)*, 2023, pp. 1001–1012.

[17] N. Khammassi *et al.*, "OpenQL: A portable quantum programming framework for quantum accelerators," *ACM Trans. Quantum Comput.*, vol. 18, no. 1, Art. 13, 2021.

[18] A. J. Adams, S. Khan, J. S. Young, and T. M. Conte, "Qwerty: A basis-oriented quantum programming language," *arXiv preprint arXiv:2404.12603*, 2024.

[19] F. Voichick, L. Li, R. Rand, and M. Hicks, "Qunity: A unified language for quantum and classical computing," *Proc. ACM Program. Lang.*, vol. 7, POPL, Art. 32, 2023.

[20] A. W. Cross, L. S. Bishop, J. A. Smolin, and J. M. Gambetta, "Open quantum assembly language," *arXiv preprint arXiv:1707.03429*, 2017.

[21] A. Cross *et al.*, "OpenQASM 3: A broader and deeper quantum assembly language," *ACM Trans. Quantum Comput.*, vol. 3, no. 3, pp. 1–50, 2022.

[22] C. Fu, J. E. G. Smith, and Y. Tomita, "cQASM v1.0: Towards a common quantum assembly language," *arXiv preprint arXiv:1805.09607*, 2020.

[23] A. J. Landahl *et al.*, "Jaqal: The quantum assembly language for QSCOUT," Sandia National Laboratories Technical Report, 2020.

[24] D. S. Lobser *et al.*, "Transpiling quantum assembly language circuits to a qudit form," *arXiv preprint arXiv:2409.18963*, 2020.

[25] A. Karamlou *et al.*, "A MLIR dialect for quantum assembly languages," *arXiv preprint arXiv:2101.11365*, 2020.

[26] A. Suau, G. Staffelbach, and A. Todri-Sanial, "qprof: A gprof-inspired quantum profiler," *ACM Trans. Quantum Comput.*, vol. 4, no. 1, pp. 1–28, 2022.

[27] R. Jain, *The Art of Computer Systems Performance Analysis: Techniques for Experimental Design, Measurement, Simulation, and Modeling*. John Wiley & Sons, 1991.

[28] M. S. Nikulin, "Hellinger distance," in *Encyclopedia of Mathematics*, M. Hazewinkel, Ed. Springer, 2001.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores declaramos haber utilizado Claude Fable 5 para múltiples tareas: el apoyo en la estructura y redacción y el procesamiento y análisis de datos. Todos los resultados e información asistidos por IA fueron revisados, verificados y validados minuciosamente por los autores, quienes asumen plena responsabilidad por la precisión, coherencia e integridad del contenido publicado.