Revista de Investigación Agraria y Ambiental

VOLUMEN 17 NÚMERO 2 – (JULIO - DICIEMBRE DE 2026) * E-ISSN 2145-6453 * ISSN 2145-6097



RIAA

UNAD Universidad Nacional Abierta y a Distancia

ACREDITADA EN ALTA CALIDAD

ECAPMA Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente

REVISTA DE INVESTIGACIÓN AGRARIA Y AMBIENTAL

VOLUMEN 17 NÚMERO 2 – (JULIO - DICIEMBRE DE 2026)

E-ISSN 2145-6453
ISSN 2145-6097

Revista de Investigación Agraria y Ambiental

Volumen 17, Número 2 – (Julio - Diciembre de 2026) – e-ISSN 2145-6453 - ISSN 2145-6097

CUERPO DIRECTIVO

JAIME ALBERTO LEAL AFANADOR
Rector UNAD

CONSTANZA ABADÍA GARCÍA
Vicerrector Académica y de Investigación

EDGAR GUILLERMO RODRÍGUEZ
Vicerrector de Servicios a Aspirantes, Estudiantes y Egresados

LEONARDO YUNDA PERLAZA
Vicerrector de Medios y Mediaciones Pedagógicas

MARTHA VIVIANA VARGAS GALINDO
Vicerrector de Desarrollo Regional y Proyección Comunitaria

LEONARDO EVEMELETH SANCHEZ TORRES
Vicerrector de Relaciones Internacionales

JORDANO SALAMANCA BASTIDAS
Decano Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente

JUAN SEBASTIÁN CHIRIVÍ SALOMÓN
Líder Nacional de Investigación

CAROLINA GUTIERREZ
Líder Nacional de Investigación
Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente

EQUIPO EDITORIAL

GERARDO OJEDA
Director Editor

MARGARITA ROSA BONILLA OSPINA
Co-editora

COMITÉ EDITORIAL

JORDI SARDANS
Investigador – Unidad de Ecologia Global CREAF-CSIC Universitat Autònoma de Barcelona, España.

JÖRG BACHMANN
Institut für Bodenkunde. Leibniz Universität Hannover, Alemania.

ABÍLIO SOBRAL
Centro de Química. Universidade de Coimbra, Portugal.

ELISABETE FIGUEIREDO
Departamento de Ciências Sociais, Políticas e do Território. Universidade de Aveiro, Portugal.

XAVIER DOMENE
Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals - CREAF. Universitat Autònoma de Barcelona, España.

FILIPA BESSA
Centro de Ciências do Mar e do Ambiente - MARE. Universidade de Coimbra, Portugal.

MARCELO GANDINI
Facultad de Agronomía. Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Argentina.

HENRY ZÚÑIGA BENÍTEZ
Departamento de Ingeniería Química. Universidad de Antioquia, Colombia.

CARLOS ABANTO RODRÍGUEZ
Manejo integral del bosque y servicios ecosistémicos. Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana, Perú.

SUSANA RODRÍGUEZ BURITICÁ
Ecología Espacial. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Colombia.

ROLANDO TITO BACCA IBARRA
Departamento de Sanidad Vegetal. Universidad del Tolima, Colombia.

FERNANDO FERNÁNDEZ MÉNDEZ
Facultad de Ingeniería Forestal. Universidad del Tolima, Colombia.

JESÚS VARGAS HERNÁNDEZ
Departamento de Ciencias Forestales. Colegio de Posgraduados, México.

EDGAR JOSÉ JAIMES CÁRDENAS
Facultad de Agronomía.Universidad de Los Andes, Venezuela.

MARTÍN ORLANDO PULIDO MEDELLÍN
Departamento de Medicina Veterinaria y Zootecnia. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Colombia.

VÍCTOR L. BARRADAS
Laboratorio de Interacción Planta-Atmósfera. Instituto de Ecología, UNAM.

Corrector de estilo
Hipertexto

Diseño y diagramación
Hipertexto

Información, correspondencia, suscripciones y canje Revista de investigación agraria y ambiental

Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente

Universidad Nacional Abierta y a Distancia

Calle 14 Sur N. 14-23 Bogotá, Colombia

Teléfonos: (571) 344 3700 ext. 1529. e-mail: riaa@unad.edu.co

La revista puede consultarse en su versión electrónica en:

http://hemeroteca.unad.edu.co/index. php/riaa/issue/archive

PRESENTACIÓN

La Revista de Investigación Agraria y Ambiental (RIAA) es un proyecto editorial de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), que surge en el año 2009 con el fin de comunicar los resultados de investigaciones originales en el área agraria y ambiental realizadas por personas, grupos o instituciones tanto nacionales como internacionales. Con el fin de mantener y afianzar la confianza entre investigadores y público interesado en las temáticas de RIAA, la revista busca su inclusión en prestigiosas bases de datos y sistemas de indexación tanto nacionales como internacionales.

Misión

La misión de RIAA es fomentar la comunicación y colaboración entre investigadores nacionales e internacionales a través de la divulgación y transferencia de conocimiento relacionado con las ciencias agrarias y del medio ambiente, con el fin de fortalecer la generación de nuevo conocimiento.

Público al que se dirige

La Revista de Investigación Agraria y Ambiental (RIAA) es una publicación oficial de la Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente (ECAPMA) de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), destinada a publicar artículos resultantes de las investigaciones originales en el área agraria y ambiental y en las áreas de conocimiento afines, en temas relacionados con los avances en producción animal, agricultura y uso sostenible de los recursos naturales. Como ejemplos de áreas afines citamos, entre otras, ética, ecología, sociología, geo- grafía, historia, derecho, educación y economía, cuando se ocupan de perspectivas del desarrollo, de estilos de agricultura, de historia agraria, de desarrollo sustentable, de bioética y ética ambiental, de educación ambiental y extensión rural, de política agraria y ambiental, de legislación ambiental, forestal y agraria o de contribuciones significativas e innovadoras con visión sistémica, interdisciplinaria y/o transdisciplinaria. La publicación circula en formato impreso y en forma electrónica con acceso libre.

Periodicidad

RIAA es una publicación semestral (Enero-Junio y Julio-Diciembre).

CESIÓN DE DERECHOS

RIAA, al momento de recibir la postulación de un manuscrito por parte de su autor, ya sea a través de correo electrónico o postal, considera que puede publicarse en formatos físicos y/o electrónicos y facilitar su inclusión en bases de datos, hemerotecas y demás procesos de indexación.

Se autoriza la reproducción y citación del material de la revista, siempre y cuando se indique de manera explícita el nombre de la revista, los autores, el título del artículo, volumen, número y páginas.

Las ideas y conceptos expresados en los artículos son responsabilidad de los autores y en ningún caso reflejan las políticas institucionales de la UNAD.

INDEXACIONES

La Revista de Investigación Agraria y Ambiental es indexada en las siguientes bases de datos especializadas.

Publindex Indexación - Homologación	La Base Bibliográfica Nacional - BBN **Publindex**, que hace parte del Sistema Nacional de Indexación y Homologación, es dirigida por el Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación, Colciencias. Está constituida por la información integrada por las revistas especializadas de CT+I sobre su producción, donde se hace visible para consulta en línea la información bibliográfica recolectada de los documentos hasta el nivel de resumen.
www.cabi.org CAB Abstracts Veterinary Science Database	**CABI** es una organización intergubernamental sin fines de lucro, que proporciona información y servicios de carácter científico en el mundo desarrollado y en desarrollo. **CAB Abstracts:** es una base de datos que ayuda a documentar la literatura publicada en el mundo, en: agricultura, medio ambiente, ciencias veterinarias, ciencias vegetales, micología y parasitología, economía aplicada, ciencias de la alimentación, salud humana, nutrición y temas relacionados. **The veterinary Science Database** cubre todos los aspectos de la medicina veterinaria y las enfermedades de los animales domésticos y salvajes por antropodos, helmintos, protozoos y hongos.
Environment Index Coverage Fuente Académica Plus EBSCOhost	**Environment index:** BBase de datos de información en temáticas relacionadas con: agricultura, ciencias del mar y agua dulce, ecología de ecosistemas, geografía, energía, fuentes renovables de energía, recursos naturales, contaminación y gestión de residuos, tecnología ambiental, legislación ambiental, políticas públicas, planificación urbana e impactos sociales. **Fuente Académica Plus** es una base de datos que abarca las principales disciplinas académicas, ofrece revistas en español y portugués para la investigación académica. Ofrece muchas revistas de calidad de América Latina, Portugal y España, incluyendo el texto completo activo de 13 títulos A1 de Qualis.
Academic Search Complete	**ACADEMIC SEARCH COMPLETE** ofrece una gran colección de revistas académicas multidisciplinarias en texto completo, proporcionando a los usuarios acceso a información crítica de muchas fuentes únicas. Además, incluye texto completo revisado por pares. El contenido académico cubre una amplia gama de importantes áreas incluyendo antropología, ingeniería, derecho, ciencias y muchas más.
REDIB Red Iberoamericana	**REDIB** (RED IBEROAMERICANA DE INNOVACIÓN Y CONOCIMIENTO CIENTÍFICO) es una plataforma para la agregación de contenidos científicos y académicos en formato electrónico en el espacio Iberoamericano. REDIB proporciona acceso y facilita la difusión y ejecución del trabajo científico. Los destinatarios de esta información son tanto la comunidad académica y sociedad en general, así como los responsables de la política científica y aquellos encargados de ponerla en práctica y analizarla.
PERIÓDICA	**PERIÓDICA** es una base de datos bibliográfica creada en 1978 en la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). La base de datos se actualiza diariamente y más de 10 mil registros son agregados cada año. Ofrece alrededor de 336 mil registros bibliográficos de artículos originales, informes técnicos, estudios de caso, estadísticas y otros documentos publicados en cerca de 1 500 revistas de América Latina y el Caribe, especializadas en ciencia y tecnología.
Dialnet	**Dialnet** es una base de datos de acceso libre, creada por la Universidad de La Rioja (España), que difunde producción científica hispana.
BASE	**BASE** es uno de los motores de búsqueda más voluminosos del mundo, especialmente para recursos web académicos. BASE proporciona más de 120 millones de documentos de más de 6,000 fuentes. Puede acceder a los textos completos de aproximadamente el 60% de los documentos indexados de forma gratuita (Acceso abierto). BASE es operado por la Biblioteca de la Universidad de Bielefeld.
GALE ACADEMIC ONEFILE	**GALE Academic Onefile** proporciona millones de artículos de más de 17,000 revistas académicas y otras fuentes autorizadas, incluidos videos de BBC Worldwide Learning a miles de podcasts y transcripciones de CNN. Incluye más de 11.000 revistas revisadas por pares (más de 8.000 en texto completo) y conjuntos de referencias importantes, como Gale Encyclopaedia of Science y Encyclopaedia of World Biography.
Google Académico	**Google Académico** proporciona una forma sencilla de realizar búsquedas amplias de literatura académica. Desde un solo lugar, puede buscar en muchas disciplinas y fuentes: artículos, tesis, libros, resúmenes y opiniones judiciales, de editoriales académicas, sociedades profesionales, repositorios en línea, universidades y otros sitios web. Google Scholar lo ayuda a encontrar trabajos relevantes en el mundo de la investigación académica

ProQuest Agricultural & Environmental Science Database	**ProQuest** conserva amplia y variada información, tanto de archivos históricos, como de los avances científicos actuales y maneja tecnologías digitales que optimizan la búsqueda, inter- cambio y gestión de la información. **THE AGRICULTURAL & ENVIRONMENTAL Science Database** de ProQuest es un recurso interdisciplinario de contenido de texto completo junto con la indexación experta de la literatura mundial en estos campos y disciplinas relacionadas. Cuenta con revistas revisadas por pares, publicaciones comerciales, revistas, literatura gris, documentos de trabajo, documentos de conferencias y procedimientos. Además, la base de datos de ciencias agrícolas y ambientales incluye declaraciones y resúmenes de impacto ambiental en texto completo y AGRICOLA, la base de datos bibliográfica de literatura científica agrícola líder en el mundo. La base de datos proporciona una solución única para la investigación agrícola y disciplinas afines que incluyen: economía agrícola, ciencias animales y veterinarias, acuicultura y pesca, agricultura y sistemas agrícolas, alimentación y nutrición humana, silvicultura, y ciencias vegetales.
OCLC WorldCat	**OCLC (Online Computer Library Centre)** es una cooperativa de 72,035 bibliotecas de 171 países con el doble objetivo de mejorar el acceso a la información y reducir el costo de las bibliotecas. El CRAI de la URV se unió a OCLC en mayo de 2014 cooperando con Worldcat Local. Más de 1.4 millones de artículos con acceso de un clic al texto completo (cuando los recursos están suscritos por la URV o son de acceso abierto) o las referencias bibliográficas que permiten ubicar u ordenar el artículo a través del servicio de préstamo interbibliotecario. Además, más de 40 millones de elementos digitales de fuentes confiables como Google Books y archivadores y repositorios digitales líderes como OAIster, ArchiveGrid y HathiTrust y con más de 25 millones de libros en bibliotecas de todo el mundo.
DOAJ DIRECTORY OF OPEN ACCESS JOURNALS	**Directory of Open Access Journals (DOAJ)** lista revistas de acceso libre, científicas y académicas, que cumplan con estándares de alta calidad al utilizar la revisión por pares o control de calidad editorial y que sean gratuitas para todos al momento de su publicación, sobre la base de la definición de acceso libre adoptada en la Budapest Open Access Initiative (BOAI).12 El objetivo del DOAJ es "incrementar la visibilidad y facilitar el uso de revistas científicas y académicas de acceso libre, de manera que se promueve su mayor uso e impacto. Debido a que el acceso libre es un fenómeno mundial, el DOAJ incluye publicaciones de todo el mundo en muchos idiomas. Es posible navegar por las revistas o buscar por artículos en el interior de muchas revistas, por medio de una interfaz. En mayo de 2009, la base de datos bibliográfica contenía 4.177 revistas, de las cuales 1.531 estaban catalogadas a nivel de artículo
Índice de revistas en consolidación ameliCA	**AmeliCA** es una infraestructura de comunicación para la publicación académica y la ciencia abierta, sostenida de forma cooperativa y centrada en el modelo de publicación sin fines de lucro para conservar la naturaleza académica y abierta de la comunicación científica. AmeliCA (premio Sparc a la innovación 2019) es impulsada por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) y liderada por el Consejo Latinoamericano de Ciencias Sociales (CLACSO), la Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal (Redalyc) y un conjunto de instituciones académicas.
OAJI .net Open Academic Journals Index	**Open Academic Journals Index (OAJI)** es una base de datos de texto completo de revistas científicas de acceso abierto. Fundador - International Network Center for Fundamental and Applied Research, Estados Unidos. La misión es desarrollar una plataforma internacional para indexar las revistas científicas de acceso abierto. El Índice Global Actual de la Revista (CGIJ) OAJI se crea teniendo en cuenta las tendencias y los desafíos mundiales actuales en el campo de la indexación de las revistas científicas. CGIJ OAJI considera las bases de datos de citas cienciométricas (WoS, Scopus), así como la base de datos básica de acceso abierto (DOAJ).
ROAD DIRECTORY OF OPEN ACCESS SCHOLARLY RESOURCES	**ROAD** es un servicio ofrecido por el Centro Internacional ISSN con el apoyo del Sector de Comunicación e Información de la UNESCO. Lanzado en diciembre de 2013, ROAD ofrece ac- ceso gratuito a los registros bibliográficos de ISSN que describen los recursos académicos en Acceso Abierto: revistas, series monográficas, actas de congresos, repositorios académicos y blogs académicos. Estos registros, creados por la red ISSN (89 centros nacionales en todo el mundo + el Centro Internacional), se enriquecen con información extraída de bases de datos de indexación y abstracción, directorios (DOAJ, Latindex, registro de Keepers) e indicadores de revistas (Scopus).
Ranking Rev-Sapiens 2018	Galardón obtenido por RIAA en el año 2018 como una de las revistas colombianas con mayor visibilidad internacional

REVISORES ACADÉMICOS

Volumen 17, Número 2, año 2026.

La Revista de Investigación Agraria y Ambiental – RIAA, reconoce a los revisores su tiempo y esfuerzo para evaluar los trabajos que se someten a esta revista. Gracias por su destacada colaboración y sus valiosas aportaciones.

Allan Enrique Bolívar Lobato, Universidad de Almería, España

Araceli Amaya Chávez, Universidad Autónoma del Estado de México, México

Ariel Antonio Agudelo Sánchez, Universidad de la Amazonia, Colombia

Bryan Alemán Montes, Universidad de Costa Rica, Costa Rica

Elizabeta Hernández Domínguez, Tecnológico Nacional de México, Campus Acayucan, México

Enrique Maldonado, Universidad de Talca, Chile

Fanny Adabel González, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, México

Fernando Casanoves, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Costa Rica

Francisco José Muñoz Ordoñez, Universidad Surcolombiana, Colombia

Francisco Muñoz, Universidad Surcolombiana, Colombia

James Larry Vinasco Hernández, UNIMINUTO, Colombia

Jeammy Julieth Sierra Hernández, Escuela Superior de Administración Pública, Colombia

Jesús Gerardo García Olivares, Instituto Politécnico Nacional, México

Jordana Georgin, University De la Costa, Colombia

Jorge Antonio Herrera Cárdenas, Universidad Tecnológica De Izúcar De Matamoros, México

Jorge Guevara Vásquez, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú

José Luis Reyes Carrillo, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, México

José Villa Parejo, Universidad del Magdalena, Colombia

Juan Manuel Trujillo González, Universidad de los Llanos, Colombia

Juan P. Taramuel-Taramuel, Universidad Nacional de Colombia, Colombia

Ludwing Cárdenas, Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac, Perú

Magdiel Torres de la Cruz, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, México

Mariana Benítez, Universidad Nacional Autónoma de México, México

Mateus Castañeda Vargas, Universidad de Antioquia, Colombia

Nallely Sánchez López, Universidad Autónoma Metropolitana, México

Oscar Eduardo Tabares Mosquera, Universidad Nacional Autónoma de México, México

Paola Portillo López, AGROSAVIA, Colombia

Remigio A. Guzmán Plazola, Colegio de Postgraduados, México

Rosa María Arias Mota, Tecnológico Nacional de México, México

Sandra Pérez Álvarez, Universidad Autónoma de Chihuahua, México

Walter Hernando Pérez Mora, Universidad Nacional de Colombia, Colombia

William Ballesteros; Universidad de Nariño, Colombia

ÍNDICE

Editorial
Director Editorial – Editor in chief: Gerardo Ojeda. Coeditora - Coeditor: Margarita Bonilla 10

Área Agrícola

1. EFECTO DE HONGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES EN RASGOS FUNCIONALES DE *THEOBROMA CACAO* EN VIVERO (CÓRDOBA, COLOMBIA)
EFFECT OF ARBUSCULAR MYCORRHIZAL FUNGI ON FUNCTIONAL TRAITS OF *THEOBROMA CACAO* IN NURSERY CONDITIONS (CÓRDOBA, COLOMBIA) 11
Daniela Cogollo Roldán, José Luis Contreras Santos, Juan Carlos Linares Arias, Judith Martínez Atencia, Cindy Katherine Falla Guzmán, Jeyson Garrido Pineda, Wilmar Wilches Ortiz

2. INFLUENCIA DE LAS NORMATIVAS EUROPEAS EN LA PRODUCCIÓN Y COMERCIALIZACIÓN DE PASIFLORAS COLOMBIANAS
INFLUENCE OF EUROPEAN REGULATIONS ON THE PRODUCTION AND MARKETING OF COLOMBIAN PASSION FRUITS 41
Pilar Rojas-Gracia, Vilma Moreno-Melo, Luis Miguel Acosta, Jhon Mario López Alberto

3. MICROORGANISMOS ASOCIADOS A LA RIZOSFERA DE PLANTAS DE CAFÉ: DIVERSIDAD, FUNCIONES Y PERSPECTIVAS PARA LA AGRICULTURA SOSTENIBLE
MICROORGANISMS ASSOCIATED WITH THE RHIZOSPHERE OF COFFEE PLANTS: DIVERSITY, FUNCTIONS, AND PERSPECTIVES FOR SUSTAINABLE AGRICULTURE 77
David Alberto Portillo Benavides, Stephany Hurtado-Clopatosky, Diego Andrés Abril Herrera

4. PHYSIOLOGICAL PARAMETERS OF LATEX IN RRIM 600 AND FX 3864 RUBBER CLONES IN COLOMBIA
PARÁMETROS FISIOLÓGICOS DEL LÁTEX EN LOS CLONES DE CAUCHO RRIM 600 Y FX 3864 EN COLOMBIA 121
Franck Rivano, Juan David Hernández Arredondo, Jorge Humberto Argüelles Cárdenas, Maribel Tarazona Yanes, David Ricardo Hernández Angarita, Régis Lacote

5. ANÁLISIS COMPARATIVO DE TÉCNICAS DE PRONÓSTICO PARA VARIABLES DE PRODUCCIÓN Y PRECIOS DE CAFÉ COLOMBIA
COMPARATIVE ANALYSIS OF FORECASTING TECHNIQUES FOR COLOMBIAN COFFEE PRODUCTION AND PRICE VARIABLES 139
Ximena Cifuentes Wchima, Luis Miguel Mejía Giraldo

6. ANÁLISIS DEL POTENCIAL DE LAS EXCRETAS PORCINAS COMO ABONO ORGÁNICO EN LA PRODUCCIÓN DE PLÁNTULAS DE *THEOBROMA CACAO*
ANALYSIS OF THE POTENTIAL OF SWINE MANURE AS AN ORGANIC FERTILIZER IN THE PRODUCTION OF Theobroma cacao SEEDLINGS 159
Fredy Cuellar Yustres, Manuel Francisco Polanco Castro

Área Pecuaria

7. COMPORTAMIENTO PRODUCTIVO DE CUYES (*CAVIA PORCELLUS*) SUPLEMENTADOS CON TORTA DE SEMILLA DE CHILACUÁN (*VASCONCELLEA PUBESCENS*)
PRODUCTIVE PERFORMANCE OF GUINEA PIGS (Cavia porcellus) SUPPLEMENTED WITH CHILACUÁN (Vasconcellea pubescens) SEED CAKE 181
Elizabeth Lagos Burbano, Ana Julia Mallama Goyes, Paulina Dávila Solarte, Lesvy Ramos Obando, Rosa Lila Pereira Tupaz

8. DESEMPEÑO PRODUCTIVO, SANITARIO Y VIABILIDAD ECONÓMICA DE OVINOS CRIOLLOS SUPLEMENTADOS CON BLOQUES MULTINUTRICIONALES A BASE DE HARINA DE HOJA DE YUCA Y AFRECHO DE YUCA 203

PRODUCTIVE PERFORMANCE, HEALTH STATUS, AND ECONOMIC FEASIBILITY OF CREOLE SHEEP SUPPLEMENTED WITH MULTINUTRITIONAL BLOCKS BASED ON CASSAVA LEAF MEAL AND CASSAVA BRAN

Emiro Andrés Suárez-Paternina, Yacerney Paternina-Paternina,Lorena Aguayo-Ulloa, Lorena Mestra-Vargas, José Edwin Mojica, Adriana Tofiño-Rivera

Área Ambiental

9. CAPACIDAD FUNCIONAL DE BACTERIAS SOLUBILIZADORAS DE FOSFATO AISLADAS DE SUELOS CULTIVADOS CON *ELAEIS GUINEENSIS* 229

FUNCTIONAL CAPACITY OF PHOSPHATE-SOLUBILIZING BACTERIA ISOLATED FROM SOILS CULTIVATED WITH *ELAEIS GUINEENSIS*

Karen Margarita Cotes Solano, Luz Elena Márquez Jiménez, Carla Cecilia Bolaños Contreras, Juan Carlos Prada Herrera

10. PRESENCIA DE PRODUCTOS FARMACÉUTICOS EN AGUA: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA PARA COLOMBIA 247

PRESENCE OF PHARMACEUTICAL PRODUCTS IN WATER: A SYSTEMATIC REVIEW FOR COLOMBIA

Andrés J. Bonilla-Reyes, Jonny A. Yepes-Blandón, Miguel A. Navarro-Ramírez

11. CONFLICTOS TERRITORIALES ENTRE USO Y VOCACIÓN DEL SUELO EN LA REGIÓN DEL CATATUMBO, COLOMBIA 285

TERRITORIAL CONFLICTS BETWEEN LAND USE AND LAND SUITABILITY IN THE CATATUMBO REGION, COLOMBIA

Alexander Armesto Arenas, José Manuel Alba Maldonado, Wilson Angarita Castilla

12. CHARACTERIZATION OF STANDARD HYPERSPECTRAL REFLECTANCE SPECTRA FOR HIGH- AND LOW-PRODUCTIVITY SUGARCANE PLOTS USING FUNCTIONAL DATA ANALYSIS 331

CARACTERIZACIÓN DE ESPECTROS ESTÁNDAR DE REFLECTANCIA HIPERESPECTRAL PARA LOTES DE CAÑA DE AZÚCAR DE ALTA Y BAJA PRODUCTIVIDAD MEDIANTE ANÁLISIS DE DATOS FUNCIONALES

Aldemar Reyes-Trujillo, Johann Alexis Ospina-Galíndez, Jhony Armando Benavides-Bolaños

INSTRUCCIONES PARA LOS AUTORES – GUIDE FOR AUTHORS 355

EDITORIAL

Estimados lectores

Presentamos el volumen 17, número 2, de la Revista de Investigación Agraria y Ambiental – RIAA, integrado por doce artículos que abordan desafíos actuales de los sectores agrario, pecuario y ambiental desde distintas perspectivas científicas y tecnológicas.

En el ámbito agrícola, se presentan investigaciones sobre procesos biológicos, fertilización orgánica, regulación comercial y análisis productivo en cultivos de cacao, café, palma de aceite, pasifloras y caucho; así como el análisis de reflectancia hiperespectral en cultivos de caña de azúcar.

En el área pecuaria, los lectores encontrarán alternativas de suplementación nutricional para cuyes y ovinos criollos, formuladas a partir de recursos vegetales como la semilla de chilacuán, la hoja de yuca y el afrecho de yuca. Estas investigaciones valoran sus efectos productivos, sanitarios y económicos.

La dimensión ambiental está representada por una revisión sobre la presencia de productos farmacéuticos en el agua en Colombia y por un estudio de los conflictos entre el uso y la vocación del suelo en la región del Catatumbo. Ambos trabajos aportan elementos para comprender problemáticas relevantes relacionadas con la calidad ambiental y la gestión sostenible del territorio.

Confiamos en que los conocimientos reunidos en esta edición contribuyan a la investigación, la formación académica y la toma de decisiones. Agradecemos a los autores, pares evaluadores, integrantes del equipo editorial y lectores por hacer posible este nuevo número. Asimismo, destacamos el respaldo de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD, que permite mantener el acceso abierto y gratuito a los contenidos de la revista.

Los invitamos a consultar, compartir y aprovechar los resultados de investigación presentados en esta edición.

¡Saludos cordiales!

Gerardo Ojeda
Editor en jefe – Editor-in-chief

Margarita Bonilla
Co-editora – Co-editor

Fecha de recibido: 13-02-2025
Fecha de aceptado: 27-10-2025
DOI: 10.22490/21456453.9146

EFECTO DE HONGOS MICORRÍCICOS ARBUSCULARES EN RASGOS FUNCIONALES DE *THEOBROMA CACAO* EN VIVERO (CÓRDOBA, COLOMBIA)

EFFECT OF ARBUSCULAR MYCORRHIZAL FUNGI ON FUNCTIONAL TRAITS OF *THEOBROMA CACAO* IN NURSERY (CÓRDOBA, COLOMBIA)

Daniela Cogollo Roldán[1]
José Luis Contreras Santos[2]
Juan Carlos Linares Arias[3]
Judith Martínez Atencia[4]
Cindy Katherine Falla Guzmán[5]
Jeyson Garrido Pineda[6]
Wilmar Wilches Ortiz[7]

Citación: 1. Cogollo Roldán, D., Contreras-Santos, J. L., Linares-Arias, J. C., Martínez-Atencia, J., Falla- Guzmán, C. K., Garrido, J. y Wilches Ortiz, W. A. (2026). Efecto de hongos micorrízicos arbusculares en rasgos funcionales de *Theobroma cacao* en vivero (Córdoba, Colombia). *Revista de Investigación Agraria y Ambiental, 17*(2), 11-39. https://doi.org/10.22490/21456453.9146

[1] Bióloga, Universidad de Córdoba, Montería, Colombia. dcogolloroldan42@correo.unicordoba.edu.co

[2] Magíster en Ciencias Agronómicas, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, Centro de Investigación Turipaná, Cereté, Colombia. jlcontreras@agrosavia.co

[3] Magíster en Ciencias Agrarias, Universidad de Córdoba, Montería, Colombia. jlinares@correo.unicordoba.edu.co

[4] Doctora en ciencias Agrarias, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, Centro de Investigación Turipaná, Cereté, Colombia. jcmartinez@agrosavia.co

[5] Ingeniera Forestal, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, Centro de Investigación Turipaná, Cereté, Colombia. cfalla@agrosavia.co

[6] Biólogo, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, Centro de Investigación Turipaná, Cereté, Colombia. jfgarrido@agrosavia.co

[7] Magíster en Biotecnología, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, Centro de Investigación Tibaitatá, Mosquera, Colombia. wwilches@agrosavia.co

RESUMEN

Contextualización del tema: El cultivo de cacao (*Theobroma cacao L.*) requiere plántulas vigorosas y fisiología estables durante la etapa de vivero, ya que esta fase condiciona su adaptación, supervivencia y desempeño posterior en campo. En este contexto, el uso de hongos formadores de micorriza arbuscular (HFMA) constituye una estrategia biológica sostenible para mejorar la adquisición de nutrientes, estimular el desarrollo radicular y reducir la dependencia de fertilizantes químicos en los sistemas de producción cacaoteros.

Vacío de conocimiento: A pesar del potencial de los HFMA como bioinsumos, aún existe información limitada sobre la respuesta funcional de plántulas de cacao frente a inóculos individuales procedentes de bancos de germoplasma, en comparación con consorcios micorrícicos nativos asociados a zonas productoras de cacao en el departamento de Córdoba, Colombia.

Propósito del estudio: Esta investigación tuvo como objetivo evaluar el efecto de inóculos individuales de HFMA provenientes del Banco de Germoplasma de Agrosavia y de consorcios nativos de HFMA sobre rasgos funcionales morfológicos, fisiológicos y micorrícicos de plántulas de cacao en etapa de vivero.

Metodología: Se estableció un diseño completamente al azar bajo condiciones de vivero, con nueve tratamientos: seis tratamientos inoculados con HFMA y tres testigos con diferentes niveles de fertilización química, correspondientes al 100 %, 50 % y 0 % de la dosis recomendada. Cada tratamiento contó con tres repeticiones. Al finalizar el ciclo experimental, después de cinco meses, se evaluaron rasgos morfológicos y fisiológicos de las plántulas, así como variables asociadas a la simbiosis micorrícica, incluyendo la colonización radicular y la cuantificación de esporas en el suelo rizosférico.

Resultados y conclusiones: La inoculación con HFMA modificó positivamente los rasgos funcionales de las plántulas de cacao. El consorcio nativo de Puerto Libertador (T2) mostró el mejor desempeño, al superar en promedio a los demás tratamientos en 45,6 % en peso seco aéreo, 10,3 % en longitud de raíces finas y 16,9 % en densidad de longitud de raíces. Así mismo, otros tratamientos inoculados con HFMA igualaron o superaron a los controles con fertilización química en varios rasgos morfológicos y fisiológicos. Estos resultados evidencian que la simbiosis micorrícica favorece el crecimiento y desarrollo de plántulas de cacao en vivero, con potencial para reducir de forma parcial el uso de fertilizantes de síntesis química y fortalecer estrategias de manejo sostenible en sistemas cacaoteros.

Palabras clave: fertilización, hongos micorrícicos, nutrición de las plantas, *Theobroma cacao*, rasgos funcionales.

ABSTRACT

Contextualization: Cocoa (*Theobroma cacao L.*) cultivation requires vigorous and physiologically stable seedlings during the nursery stage, as this phase determines their adaptation, survival, and subsequent field performance. In this context, the use of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) represents a sustainable biological strategy to improve nutrient uptake, stimulate root development, and reduce dependence on chemical fertilizers in cocoa production systems.

Knowledge gap: Despite the potential of AMF as bioinputs, limited information is available on the functional response of cocoa seedlings to individual inocula from germplasm banks compared with native mycorrhizal consortia associated with cocoa-producing areas in the department of Córdoba, Colombia.

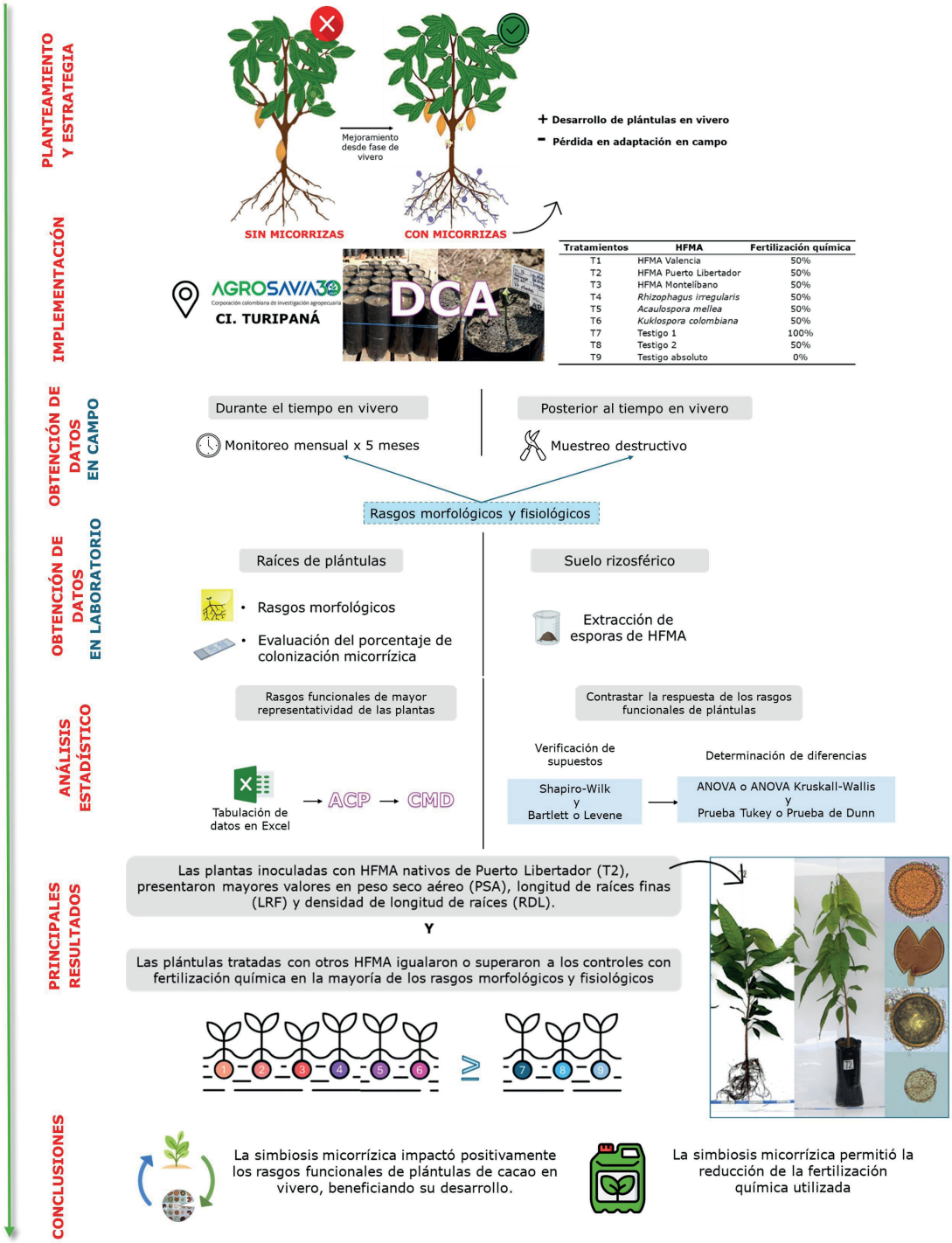
Purpose: This study aimed to evaluate the effect of individual AMF inocula from the AGROSAVIA Germplasm Bank and native AMF consortia on the morphological, physiological, and mycorrhizal functional traits of cocoa seedlings under nursery conditions.

Methodology: A completely randomized design was established under nursery conditions, with nine treatments: six AMF-inoculated treatments and three controls with different levels of chemical fertilization, corresponding to 100%, 50%, and 0% of the recommended dose. Each treatment included three replicates. At the end of the experimental cycle, after five months, morphological and physiological traits of the seedlings were evaluated, along with variables associated with mycorrhizal symbiosis, including root colonization and spore quantification in the rhizosphere soil.

Results and conclusions: AMF inoculation positively modified the functional traits of cocoa seedlings. The native consortium from Puerto Libertador (T2) showed the best performance, exceeding the other treatments by an average of 45.6% in shoot dry weight, 10.3% in fine-root length, and 16.9% in root length density. Likewise, other AMF-inoculated treatments equaled or outperformed the chemically fertilized controls in several morphological and physiological traits. These results show that mycorrhizal symbiosis promotes the growth and development of cocoa seedlings under nursery conditions, with potential to partially reduce the use of synthetic chemical fertilizers and strengthen sustainable management strategies in cocoa production systems.

Keywords: fertilization; mycorrhizal fungi; plant nutrition; Theobroma cacao; functional traits.

RESUMEN GRÁFICO



Fuente: autores.

1 INTRODUCCIÓN

El cultivo de cacao es de gran importancia económica y cultural, experimenta un crecimiento notable en su demanda global, impulsada por la preferencia hacia productos de fino sabor y aroma. A nivel mundial, países como Costa de Marfil, Ghana e Indonesia lideran la producción. Colombia, a pesar de ser de los menores productores a escala global, se distingue del resto por la alta calidad de su grano, con un 95 % catalogado como fino de sabor y aroma (Abbott et al., 2018; Romero, 2023). A nivel nacional, la producción de cacao ha aumentado en un 61 % en la última década, siendo Santander el departamento con mayor producción, seguido de Antioquia, Arauca, Huila y Tolima (Romero, 2023). Según la UPRA (2023), en el departamento de Córdoba, la producción se concentra en cinco municipios con alta aptitud: Valencia, Tierralta, Montelíbano, Los Córdobas y Puerto Libertador, siendo Valencia el de mayor potencial, con 63.114 hectáreas aptas para el cultivo.

El aumento en la demanda mundial de alimentos ha llevado a un incremento en la producción y uso de plaguicidas y fertilizantes, generando efectos negativos en el medio ambiente, como la degradación del suelo y la eutrofización de fuentes de agua (Nath et al., 2023). Esta problemática se agrava en países como Colombia, donde la expansión agrícola conlleva a la deforestación y al uso intensivo de agroquímicos para mejorar la productividad de suelos poco fértiles (Pulleman et al., 2024). Sin embargo, estos productos generan efectos adversos en el ambiente. En este sentido, la implementación de nuevas estrategias de fertilización basadas en componentes biológicos constituye una alternativa eficaz para suplir o reducir el uso de fertilizantes de síntesis química (Kakouridis et al., 2022).

Es importante mencionar que el éxito del cultivo de cacao está relacionado con buenas prácticas agrícolas en fase de vivero, donde se aplican técnicas para mejorar la calidad del suelo y promover el crecimiento de las plántulas. Sin embargo, la eficacia de estas prácticas se mide principalmente en los aspectos foliares, dejando de lado el desarrollo radicular, siendo este de vital importancia en el sostenimiento de las plantas, lo que se entiende, en un óptimo desarrollo radicular le permite al individuo absorber la cantidad necesaria de nutrientes y agua, así como anclaje al suelo (Herrera-Monroy et al., 2023).

Con esto, se hace necesario profundizar en cómo se podría promover el crecimiento total de la planta, en su parte aérea y radicular, asociado al uso de recursos biológicos en lugar de agroquímicos. Una estrategia esencial es el uso de microorganismos, particularmente los hongos formadores de micorriza arbuscular (HFMA), los cuales son simbiontes obligados, endomicorrícicos, de amplia distribución global y diseminados a través del suelo (Branco et al., 2022). Los HFMA aumentan la capacidad de absorción de nutrientes por parte de las raíces de las plantas, especialmente fósforo (P) y nitrógeno (N) (Ahammed & Hajiboland, 2024). Como

contrapartida, las plantas hospedadoras proporcionan al hongo simbionte fotosintatos ricos en carbono (C), tales como azúcares y lípidos. Este intercambio bidireccional de nutrientes ejerce una profunda influencia en los ecosistemas vegetales y microbianos, ya que afecta la aptitud de las plantas, los procesos biogeoquímicos del suelo y el ciclo del carbono (Ahammed & Hajiboland, 2024).

Para abordar los desafíos ambientales y potenciar la aptitud de las plántulas de cacao, se propuso la implementación de una estrategia basada en la micorrización. El objetivo de esta investigación fue evaluar seis inóculos de HFMA, individuales del banco y en consorcio nativos frente a testigos con fertilización química, sobre la respuesta de rasgos funcionales de plántulas de cacao.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación del experimento y material vegetal

La investigación se desarrolló en el Centro de Investigación Turipaná de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - Agrosavia (8°50'51.58"N - 75°48'55.86"O), localizado en el departamento de Córdoba, municipio de Cereté, con altitud de 18 m s. n. m. (Figura 1), temperatura promedio anual de 28 °C, humedad relativa de 81 %, evapotranspiración potencial de 1240 mm y precipitación promedio anual de 1380 mm (datos de la estación climatológica Turipaná, red agroclimática del IDEAM - número de estación: 13075030). Con dos periodos climáticos definidos, un periodo de lluvias de mayo a noviembre y un periodo de baja pluviosidad de diciembre a marzo. Según (Holdridge, 1982), el área de estudio pertenece a la zona de vida bosque seco tropical (Bs-T). Se implementó el ensayo a nivel de vivero, bajo condiciones ambientales no controladas para la especie *Theobroma cacao*, utilizando almendras del clon IMC 67. Se emplearon 27 semillas por tratamiento, con tres repeticiones, para un total de 729 semillas.

Microorganismos: Estudios previos realizados por Agrosavia permitieron seleccionar y consolidar seis inóculos con HFMA, tres de estos corresponden a consorcios nativos aislados de suelos asociados a sistemas agroforestales con cacao, en los municipios de Valencia, Puerto Libertador y Montelíbano. Los otros tres inóculos fueron seleccionados del Banco de Germoplasma administrado por Agrosavia. Estos inóculos estuvieron conformados con esporas de la siguiente forma: el inóculo 1 con esporas nativas del municipio de Valencia; el inóculo 2 de Puerto Libertador; el inóculo 3 de Montelíbano; el inóculo 4 de *Rhizophagus irregularis* (Krüger et al., 2012; Schüssler & Walker, 2010); el inóculo 5 de *Acaulospora mellea* (Schenck et al., 1984) y el inóculo 6 de *Kuklospora colombiana* (Sieverding & Oehl, 2006). La multiplicación de todos los inóculos HFMA se realizó en el Centro de Investigación Tibaitatá de Agrosavia, mediante "cultivo trampa" (Morton et al., 1995) con

hospederos de uchuva (*Physalis peruviana*) en macetas de 500 g de capacidad, utilizando como sustrato suelo: arena estériles (3:1 v/v). El control de calidad del inóculo se realizó siete meses después, mediante la técnica de tamizado húmedo y decantación propuesta por Gerdemann y Nicolson (1963), con un recuento de 40 a 120 esporas.g^{-1}. En el caso de los consorcios, no se realizó identificación taxonómica de las esporas presentes.



Figura 1. Localización del área de estudio (establecimiento del vivero). Centro de Investigación Turipaná, Cereté, Córdoba, Colombia

Fuente: autores.

Diseño experimental

Se empleó un diseño experimental al azar (DCA) con tres repeticiones y una unidad experimental de 27 plantas. Se evaluó el potencial simbiótico de seis aislamientos de HFMA más 50 % de fertilización química (NPK) requerida para esta etapa del cultivo, tres de ellos en consorcios y tres individuales, frente a tres testigos con el 100 %, 50 % y 0 % de fertilización química (Tabla 1). Estos ensayos se establecieron usando como sustrato: aluvión, arena y abono orgánico

(2:2:1v/v/v). Se utilizó desinfectante de suelos con ingrediente activo 1.3 Diformil propano para la esterilización del sustrato (aluvión y arena), adicionalmente se utilizó la técnica de solarización durante una semana (siete días) (Katan et al., 1976). Las semillas se sembraron en bolsas de polietileno con dimensiones de 37 cm de longitud, 16 cm de altura y 8 cm de fuelle (volumen total de 4736 cm^3). La dosis de inoculante fue de 1 a 2 g, asegurando un total de 70 esporas.g^{-1} por planta. La fertilización de los tratamientos se realizó al inicio del experimento, aplicando en dilución fertilizantes químicos de rápida liberación en cuatro momentos (1/4 de dosis quincenalmente), se utilizó una mezcla de 3,2 g fosfato diamónico (DAP) + 0,92 g cloruro de potasio (KCl), con una dosis total de 4,12 g/planta para el testigo 100 % y la mitad de la dosis para el testigo 50 % y los tratamientos con HFMA.

Tabla 1.

Tratamientos para evaluación de HFMA en fase de vivero para la especie *Theobroma cacao*

Tratamientos	Combinación	
	HFMA	Fertilización química
T1	HFMA Valencia	50 %
T2	HFMA Puerto Libertador	50 %
T3	HFMA Montelíbano	50 %
T4	*Rhizophagus irregularis*	50 %
T5	*Acaulospora mellea*	50 %
T6	*Kuklospora colombiana*	50 %
T7	Testigo 1	100 %
T8	Testigo 2	50 %
T9	Testigo absoluto	0 %

Fuente: autores.

Sistema de muestreo y variables analizadas

Se llevó a cabo un monitoreo del crecimiento de plántulas de *Theobroma cacao* en vivero durante un periodo de cinco meses, con toma de datos mensuales, donde se registraron parámetros morfológicos como: altura de planta (cm), número de hojas y diámetro a la altura del cuello radical (mm). De igual forma, se midió la variable fisiológica de contenido de clorofila, utilizando un

medidor portátil SPAD-502Plus. Al finalizar la etapa de vivero, se tomaron datos de longitud de raíz, peso fresco y seco de parte aérea y radicular, estos se obtuvieron empleando un muestreo destructivo en el que se tomó el 10 % de las unidades experimentales, para un total de 81 muestras. Para efectos de este documento, los datos utilizados corresponden a los relacionados en la evaluación final (cinco meses de las plántulas en vivero). En este punto se tomó una muestra de suelo rizosférico de cada plántula evaluada y se llevó a laboratorio para su posterior lectura con la técnica de cuantificación de esporas de Gerdemann & Nicolson (1963) con algunas modificaciones.

Por otro lado, las raíces finas obtenidas en el muestreo destructivo fueron evaluadas con el escáner Dual Scan (EPSON V850-M), posteriormente, las imágenes generadas se procesaron con el software WinRHIZO Pro-2020®. Finalmente, las muestras se secaron a 60 °C durante 24 horas para la determinación de la biomasa seca de raíz. Los resultados generados por el *software* se exportaron a una base de datos en Excel para su posterior análisis. Así mismo, de forma indirecta se determinaron parámetros como densidad del tejido de raíz (*Root Tissue Density*, RTD), longitud específica de raíz (*Specific Root Length,* SRL) y densidad de longitud de raíz (*Root Length Density,* RLD), siguiendo la metodología descrita por Demenois et al., 2018:

Ecuación 1. $\mathrm{SRL\,(cm/g)} = \frac{L}{M}$; **Ecuación 2.** $\mathrm{RTD\,(g/cm^3)} = \frac{M}{V}$; **Ecuación 3.** $\mathrm{RLD\,(cm/cm^3)} = \frac{L}{v}$

donde L representa la longitud de las raíces finas, M es el peso seco de la raíz, V es el volumen de la raíz y v es el volumen del suelo o sustrato utilizado.

Se realizó tinción de raíces y medición del porcentaje de colonización micorrícica, utilizando el método de intersección de campos, en el cual se seleccionaron y montaron en portaobjetos las raíces teñidas en segmentos paralelos de 1 cm de longitud (Phillips & Hayman, 1970). Para la evaluación se utilizó el objetivo 40X del microscopio, empleando puntos equidistantes, comenzando por el extremo de cada raíz y en recorrido vertical, en cada campo visual se indica si existe o no colonización, con base en presencia o ausencia de hifas, arbúsculos, vesículas, células auxiliares y redes de Hartig de HFMA. Para el cálculo del porcentaje de colonización de HFMA se utilizó la ecuación 4.

Ecuación 4. $\textit{Porcentaje de colonizacion HFMA} = \frac{\textit{Campos colonizados por estructuras HFMA}}{\textit{Total de campos observados}} X\ 100$

Análisis estadístico

Para identificar los rasgos funcionales de mayor representatividad de las plántulas frente a los inóculos con HFMA, se seleccionó un conjunto mínimo de datos (CMD), utilizando un análisis de componentes principales (ACP) (Contreras-Santos et al., 2023; González García et al., 2021; Silva-Olaya et al., 2022). Este enfoque permitió identificar las variables morfológicas y fisiológicas de las plantas que explican mayormente los procesos en la simbiosis micorrícica de este experimento, con base en predicciones estadísticas.

Los componentes principales retenidos para el análisis fueron aquellos con valores propios mayores a uno (Kaiser, 1960), una regla general que ayuda a simplificar la interpretación de los factores (Martínez Castro et al., 2022). Se consideraron para el análisis las variables con los valores absolutos más altos en cada componente y 10 % por debajo de este valor (Cherubin et al., 2015 y 2016). Se confirmó la relevancia de los factores de los componentes, utilizando un análisis de correlación de Spearman ($P < 0,05$) (Cherubin et al., 2016; Silva-Olaya et al., 2022). Los factores con mayor relevancia y correlación alta fueron seleccionados dentro de cada componente principal.

Para contrastar la respuesta de los rasgos funcionales de plántulas en vivero al estímulo de inóculos con HFMA asociados a fertilización química, se utilizaron las pruebas de Shapiro-Wilk y Bartlett (para datos normales) o Levene (para datos no normales, en caso de ser requerido) para verificar supuestos de normalidad y homocedasticidad de las varianzas de los residuales. Posteriormente, se aplicó un ANOVA con prueba de comparación múltiple de Tukey ($P < 0,05$). En caso de que alguno de los supuestos no se cumpliera, se empleó un ANOVA de Kruskall-Wallis con la prueba *post-hoc* de Dunn como alternativa. Estas pruebas fueron realizadas con el programa estadístico RStudio (R Core Team, 2020).

Se llevó a cabo un análisis de correlación de Spearman con significancia de $P < 0,05$ para determinar la relación entre las variables de rasgos funcionales más representativos, y los niveles de macro y micronutrientes en el tejido foliar de plantas en etapa de vivero. Este análisis se realizó utilizando datos de contenido de nutrientes foliares obtenidos al finalizar el periodo de vivero.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cuantificación de esporas por tratamiento

Se observó diversidad de morfotipos de HFMA en cada tratamiento. Es importante destacar la presencia de esporas en los tratamientos testigos con fertilización química, en menor cantidad, lo cual pudo estar asociado a inoculación cruzada (ubicuidad de los HFMA, ya sea en el abono orgánico agregado al sustrato, el agua utilizada en el

riego en vivero, o la proximidad de los tratamientos en el diseño experimental) o a la resistencia de esporas de HFMA en el sustrato previamente esterilizado (Figura 2).

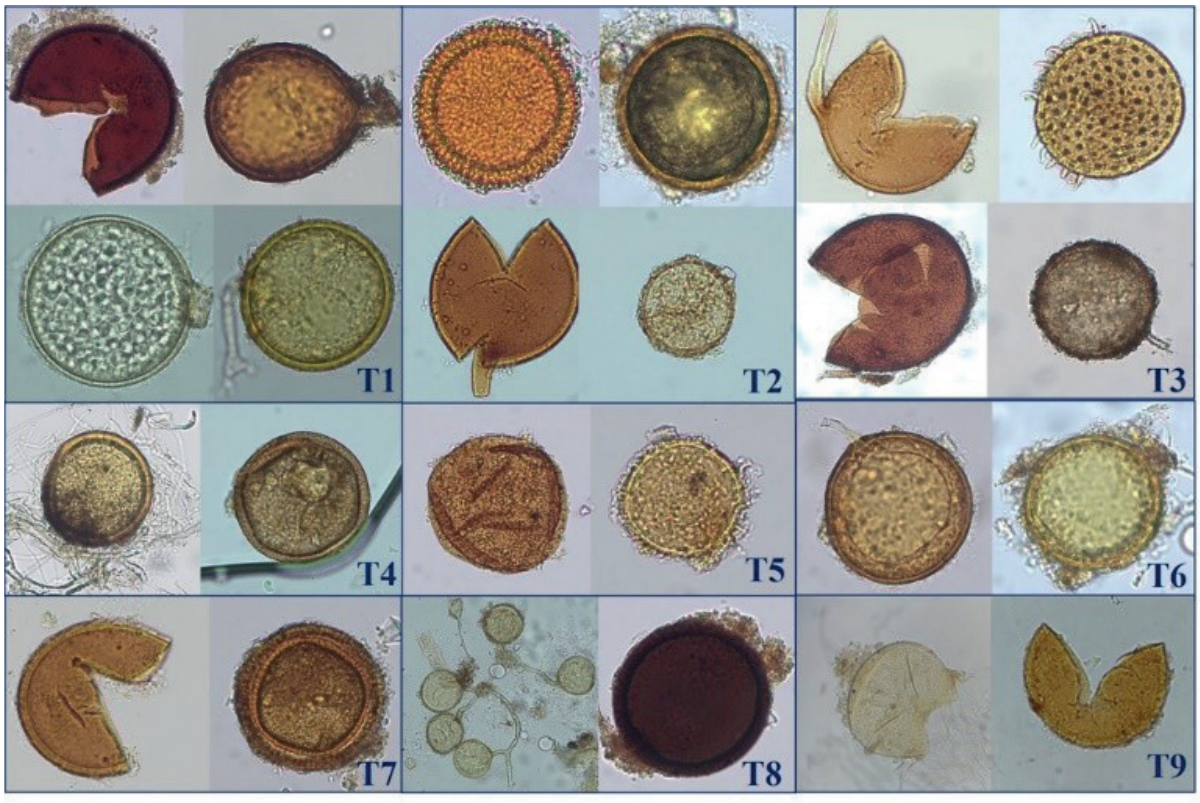


Figura 2. Morfotipos de esporas de HFMA aislados a partir de suelo rizosférico de plántulas de *Theobroma cacao* en condiciones de vivero asociadas a nueve inóculos*:* T1: HFMA Valencia; T2: HFMA Puerto Libertador; T3: HFMA Montelíbano; T4: *Rhizophagus irregularis;* T5: *Acaulospora mellea;* T6: *Kuklospora colombiana;* T7: 100 % FQ; T8: 50 % FQ; T9: 0 % FQ

Fuente: autores.

El tratamiento T2 con consorcio proveniente del municipio de Puerto Libertador presentó la mayor cantidad promedio de esporas por gramo de sustrato, con 8,9 esporas.g^{-1}, en contraste con el suelo donde se aplicó el tratamiento correspondiente al inóculo nativo de Montelíbano (T3), con el menor número de esporas por gramo de sustrato (5,6 esporas.g^{-1}) (Figura 3).

El proceso de multiplicación de los HFMA aumenta en función de factores ambientales como disponibilidad de humedad, pH y temperatura. Se ha demostrado que el estrés por sequía reduce el potencial de germinación de las esporas, por lo tanto, su aumento en número (Ahammed & Hajiboland, 2024). Los consorcios nativos utilizados en esta investigación presentaron variedad de morfotipos

de HFMA en el mismo inóculo, por lo que el número de esporas finales de cada tratamiento pudo variar, debido a la dinámica de multiplicación del hongo. Es posible que algunas de las especies en los consorcios nativos presentaran mayor capacidad de producción de esporas que otras. Cabe resaltar que las esporas finales parten de los nuevos procesos de multiplicación de cada hongo al momento de la asociación con el hospedero y para un análisis más detallado sobre la participación de los HFMA en el número final de esporas.g^{-1} de sustrato, se debe hacer un estudio enfocado a esta actuación.

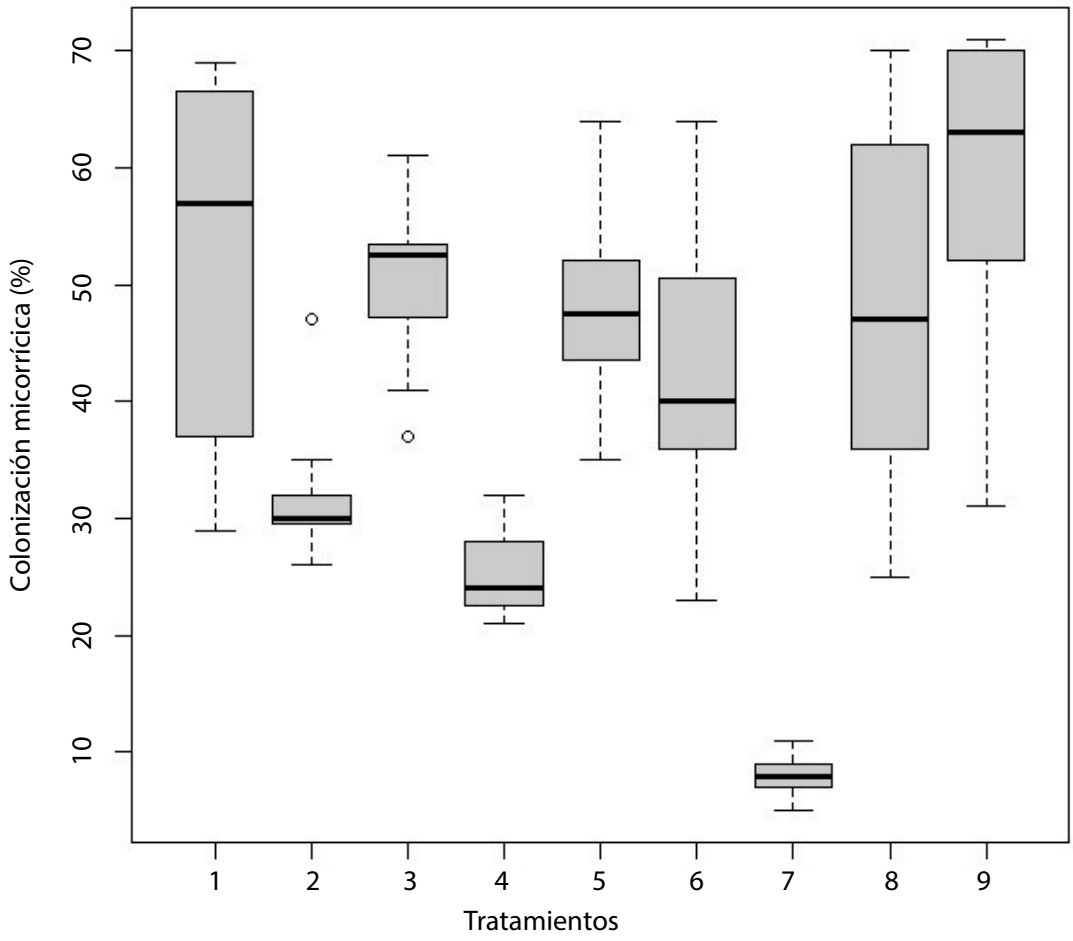


Figura 3. Cuantificación de número de esporas por gramo de sustrato en suelo rizosférico con *Theobroma cacao* en función de la inoculación con HFMA

Fuente: autores.

Colonización micorrícica

De las raíces asociadas a los tratamientos con hongos micorrícicos, se observó que la colonización micorrizal en T1 exhibió mayor porcentaje (52,2 %), mientras que T4 presentó el menor porcentaje de colonización (25,2 %) (Tabla 2). En contraste, las muestras tomadas de T7 con 100 % de fertilización química, reflejaron el menor porcentaje de colonización (7,8 %), respecto a los otros tratamientos. Igualmente, se evidenció la presencia de estructuras fúngicas en las raíces asociadas al testigo absoluto (T9), con el 58,3 % de colonización micorrícica, siendo el valor más alto de colonización reportado en esta investigación (Figuras 4 y 5). De forma natural, los hongos formadores de micorriza arbuscular se encuentran en comunidades y la mayoría de estos no tiene preferencia de hospederos, por lo cual, varios hongos pueden colonizar una misma raíz (Ramírez Gómez, 2014).

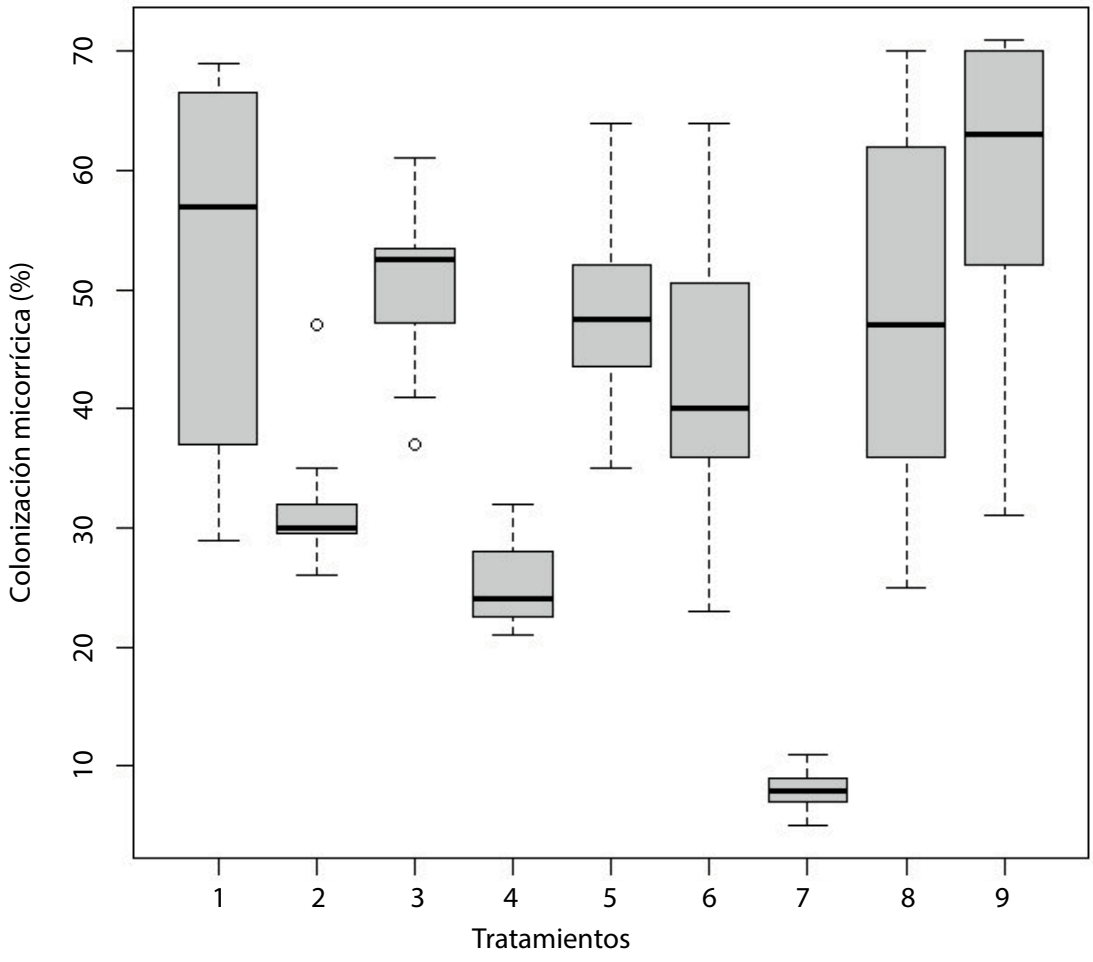


Figura 4. Promedio de colonización micorrícica en plantas de *Theobroma cacao* en función de la inoculación con HFMA y testigos con fertilización química

Fuente: autores.

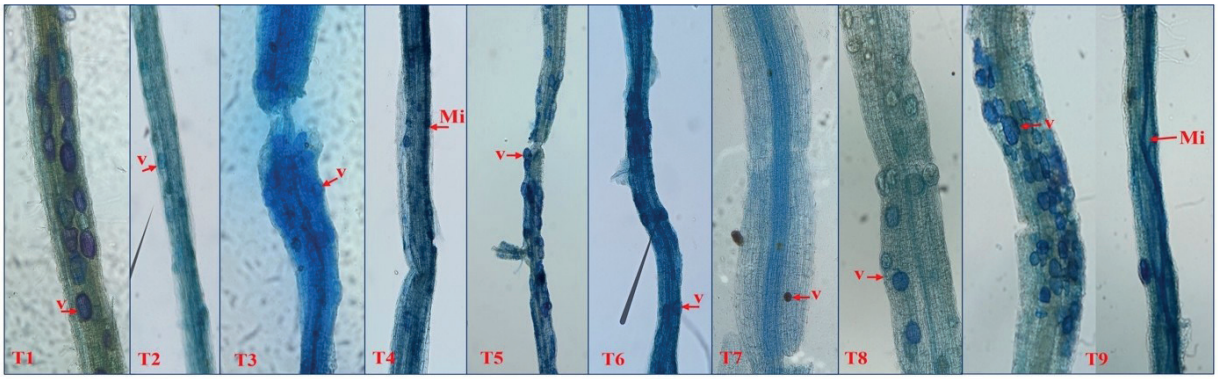


Figura 5. Colonización micorrícica observada en plántulas de *Theobroma cacao* en condiciones de vivero asociadas a seis inóculos y testigos con fertilización química: T1: HFMA Valencia; T2: HFMA Puerto Libertador; T3: HFMA Montelíbano; T4: *Rhizophagus irregularis*; T5: *Acaulospora mellea*; T6: *Kuklospora colombiana*; T7: 100 % FQ; T8: 50 % FQ; T9: 0 % FQ; v: vesículas de HFMA; Mi: micelio interno.

Fuente: autores.

En este caso, las raíces asociadas a consorcios de hongos nativos registraron mayores valores en la colonización con un incremento del 5,9 %, respecto a los inóculos con hongos individuales, lo que concuerda con lo descrito por Hernández-Acosta et al. (2020), donde obtuvo mayor colonización en tratamientos con inóculos respecto a hongos individuales, evaluando la eficiencia de los HFMA en café. Otro estudio realizado en plántulas de tomate obtuvo resultados similares en cuanto a la colonización de los hongos *Rhizophagus* y *Acaulospora* con porcentajes de colonización de 20,19 % y 28,23 %, respectivamente, demostrando la tendencia de estos simbiontes a un grado de asociación menor, encontrándose de forma individual (Suebrasri et al., 2023).

En esta investigación, el tratamiento absoluto, sin fertilización química ni inoculación directa de HFMA, por factores asociados con el método de riego, proximidad de los tratamientos y la ubicuidad de los hongos micorrícicos, o por persistencia de micorrizas oportunistas en el sustrato, se reportó presencia de esporas de HFMA, en consecuencia, se presentó un alto porcentaje de colonización y éxito de la simbiosis, lo que pudo estar relacionado a un estrés nutricional (p. e. deficiencias de fósforo), promoviendo la colonización de las raíces (Cuadros y Gómez, 2010; Ahammed & Hajiboland, 2024).

Por el contrario, T7 (100 % de fertilización química), presentó el valor más bajo de colonización (Figura 4), lo que sugiere una influencia inhibitoria por parte de la fertilización química frente a la asociación micorrícica, probablemente debido a la satisfacción de las necesidades nutricionales de la planta, tal que estudios similares sobre el establecimiento de la simbiosis de HFMA con uchuva, donde el tratamiento testigo con 100 % de fertilización química, obtuvo los valores de colonización más bajos en seis de los siete muestreos que se realizaron (Ramírez Gómez, 2014).

Tabla 2.

Descripción de parámetros morfológicos asociados a los tratamientos aplicados a plantas de *Theobroma cacao* en etapa de vivero

TTO	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
ESP	8,4 ± 3,1	8,9±2,5	5,6±3,2	7,7±3,6	6,1±2,1	6,2±2,5	2,5±0,6	3±1,4	4,2±1,4
COL	52,2 ± 16,3	32±6,1	50±7,3	25,2±3,7	48,7±8,7	42,7±14,7	7,8±2	47,5±16,4	58,3±14,4
AL	74,5± 8,6	84,9±7,9	85,1±7,7	86,8±10,7	86,8±3,6	76,9±8	74,3±9,7	84,2±8,9	70,9±4,9
DPRF	0,205+0,006	0,208+0,021	0,21±0,022	0,223±0,012	0,2±0,006	0,213±0,016	0,235±0,006	0,214±0,006	0,198±0,014
RTD	2,02±0,47	3,04±1,45	1,95±0,74	2,4±0,48	1,58±0,79	1,77±0,56	2,08±0,63	2,01±0,23	1,95±0,86
DCR	13,2±1,9	14,3±0,9	12,5±0,8	13,1±1,7	12,5±1	12,3±1,4	14,3±0,9	13,8±0,7	12,4±1
SPAD	39,3±2,6	39,2±1,6	37,7±3,6	35,2	36,9±1,6	35,4±2,3	36,9±2,3	37±3,4	33,9±2,9

ESP = número de esporas.g -1 sustrato; COL= porcentaje de colonización micorrízica; AL = altura de planta; DCR = diámetro de cuello de raíz; SPAD= contenido de clorofila foliar; DPRF = diámetro promedio de raíces finas; RTD = densidad de tejido de raíz.

Fuente: autores.

Selección de rasgos funcionales de la planta de cacao en fase de vivero

Se evaluaron 14 variables en cada uno de los nueve tratamientos evaluados en el diseño experimental, distribuidos en: un indicador de la asociación micorrícica, doce parámetros morfológicos y uno fisiológico. El análisis de componentes principales (ACP) de las variables mostró que solo cinco componentes principales (CP) fueron capaces de explicar 71,27 % de la varianza total acumulada (Tabla 3).

Dentro de estos componentes se identificaron los indicadores con mayor peso absoluto (Tabla 3), el CP-1 explicó 22,53 % de la varianza total. Los indicadores con mayor peso absoluto dentro del CP-1 fueron: el peso seco radicular (PSR) y la longitud especifica de raíz (SRL) (Tabla 3). El CP-2 explicó 16,77 % de la varianza de los datos, los indicadores de mayor peso fueron: la LRF y el RLD. El CP-3 explicó 14,16 %, siendo los parámetros peso seco aéreo (PSA) y volumen de raíces finas (VRF) los de mayor peso. Los otros CP sumados (CP-4 y CP-5) fueron capaces de explicar 17,8 % de la varianza (Tabla 3), donde los auto vectores dominantes fueron: longitud radicular (LR) en el componente (CP-4) y número de hojas en el componente (CP-5).

Tabla 3.
Análisis de componentes principales (ACP) dentro de las variables evaluadas

Componentes	CP-1	CP-2	CP-3	CP-4	CP-5
Autovalor	3,1544744	2,3481918	1,982915	1,3259395	1,1660451
Varianza (%)	22,53 %	16,77 %	14,16 %	9,47 %	8,33 %
Acumulado (%)	22,53 %	39,30 %	53,47 %	62,94 %	71,27 %
Variable*	**Vector propio**				
COL	-0,240	-0,157	0,414	-0,211	0,214
AL	0,024	-0,027	-0,064	0,359	0,456
LS	-0,140	-0,051	0,261	**0,448**	-0,459
PSA	0,139	0,209	**0,466**	0,285	0,168
PSR	**0,487**	0,163	0,054	-0,114	-0,114

Variable*	Vector propio				
LRF	-0,218	**0,532**	-0,134	-0,196	-0,118
DPRF	0,370	0,115	-0,188	0,021	-0,165
VRF	0,208	-0,003	**-0,500**	0,088	0,246
RTD	0,341	0,148	0,396	-0,249	-0,153
SRL	**-0,432**	0,235	0,031	0,202	0,016
RLD	-0,171	**0,565**	-0,099	-0,177	-0,137
DCR	0,316	0,302	0,150	0,363	0,149
HOJAS	0,002	0,114	0,198	-0,388	**0,516**
SPAD	-0,083	0,323	-0,054	0,261	0,249

**Variables descritas en tabla 2.*

Fuente: autores.

La identificación del CMD fue apoyada con el análisis de correlación de Spearman (Figura 6), donde se seleccionó el indicador de mayor peso dentro de cada componente principal (en los casos que el CP mostrara más de un indicador o variable), se tuvo en cuenta correlación significativa entre sí ($p < 0,05$). De acuerdo con esto, para el CP-1, el indicador seleccionado fue el PSR, con alta correlación significativa negativa con SRL ($r = -0,72$); en el caso del CP-2, se seleccionó la densidad de longitud de raíz (RLD), con correlación significativa con la LRF ($r = 0,91$); en el CP-3, se seleccionó el volumen de raíces finas (VRF), con correlación negativa con el PSA ($r = -0,18$); en el CP-4, se seleccionó la longitud radicular (LS) y CP-5 número de hojas (hojas).

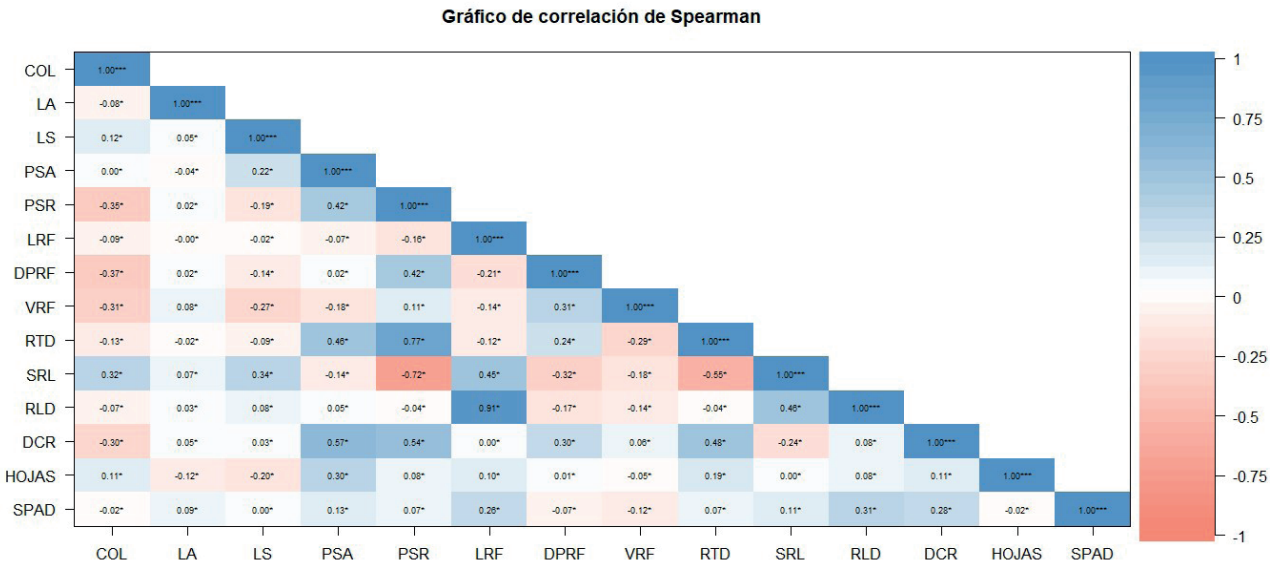


Figura 6. Correlación entre las 14 variables evaluadas a las plántulas de cacao en función la inoculación con HFMA. Correlación de Spearman (P < 0,05) *

Fuente: autores.

Efectos de la inoculación con HFMA sobre los rasgos funcionales de las plántulas de cacao

Los resultados obtenidos en este experimento mostraron que la mayoría de las variables evaluadas en el ensayo experimental se vieron afectadas significativamente (p > 0,05) por la asociación micorrícica.

El número de hojas (hojas) registró diferencias altamente significativas entre los tratamientos (p = 0,0000115). Las plántulas en la etapa final de vivero presentaron mayor número de hojas en T8 (50 % de fertilización química) (54±8 número de hojas), en contraste con T5 (*Acaulospora mellea*) el cual presentó 40±5 hojas (Figura 7A). La capacidad de obtención de luz por parte de las plantas es crucial para un crecimiento óptimo y la disponibilidad de nutrientes (NPK) juega un papel fundamental en la producción de hojas (Duarte et al., 2019). Otros estudios donde se implementó el uso de bioestimulantes, como HFMA demostraron que la simbiosis micorrícica produce plántulas con mayor número de hojas que los tratamientos con fertilización química (Zulueta et al., 2020; Ramos Otiniano et al., 2021; Rosales Escalon et al., 2022). Sin embargo, estos estudios se enfocaron en etapas de plántulas, mientras que el presente experimento se llevó a cabo desde etapas de semillas, sugiriendo que una menor producción foliar puede ser atribuida a la inversión energética prioritaria de la planta en el desarrollo de la simbiosis micorrícica y un sistema radicular eficiente, en lugar de un crecimiento aéreo acelerado (Wright et al., 2004).

Las plántulas de *T. cacao* en función de los inóculos con HFMA presentaron diferencias significativas en el peso seco aéreo (PSA, p = 0,004289) respecto a los tratamientos, siendo T2 (inóculo nativo de Puerto Libertador) donde se obtuvo el mayor registro (45,57±15,21 g) y T6 (*Kuklospora colombiana*) con el valor más bajo (24,43±8,17 g) (Figura 7B). Estos resultados al final del ciclo (etapa de vivero) se pueden explicar por la dinámica de crecimiento y acumulación de la biomasa seca, con incremento inicialmente a una tasa exponencial, posterior lineal y, finalmente, a una tasa decreciente hasta alcanzar un máximo (Di Benedetto y Tognetti, 2016). La colonización micorrícica induce cambios sistémicos en el metabolismo y fisiología de la planta. Los hongos micorrícicos (HFMA) son fuertes sumideros de carbono, debido a su dependencia de carbono de la planta para su propio crecimiento y desarrollo (Ahammed & Hajiboland, 2024). Por lo tanto, los valores de peso seco aéreo (PSA) relativamente bajos entre los tratamientos con hongos y tratamientos con fertilización química, se pueden atribuir a la dependencia del carbono por parte de los HFMA. En una simbiosis efectiva, este costo fisiológico se compensa en la absorción de nutrientes y agua por parte de la planta, además de otros beneficios (Ramírez Gómez, 2014).

Por otro lado, el peso seco radicular (PSR) registró diferencias altamente significantes (p = 0,0002777) entre los tratamientos estudiados, con valores altos en las plantas con los tratamientos T2 y T4, con 4,63±1,08 g y 4,51±0,95 respectivamente, en contraste con T5 (*Acaulospora mellea*), en el cual las raíces presentaron PSR con valores de 2,18±0,92 g (Figura 7C). Algunos autores han registrado resultados similares con relación a la variable peso seco radicular (PSR) en función de la simbiosis micorrícica (Velázquez et al., 2017; Rosales Escalon et al., 2022; Suebrasri et al., 2023). Otras investigaciones han evidenciado la efectividad de la combinación de HFMA (*Rhizoglomus irregularis*), combinado con compost fosfatado dio lugar a un aumento considerable del peso seco de raíces, así como del rendimiento de las plantas de lechuga, en comparación con las plantas de control (Anli et al., 2022), tal como en el presente estudio, teniendo en cuenta el componente de carbono orgánico presente en el sustrato utilizado en vivero.

La variable de longitud radicular (LR) mostró comportamiento diferencial entre los tratamientos (p = 0,00000063), con mayor valor en las plántulas asociadas a T5 (*Acaulospora mellea)* con 43,50±6,85 cm, superando los testigos con fertilización química (T8), lo que sugiere una asociación exitosa de los HFMA con la plántula de cacao (Figura 7 D). Sin embargo, T6 (*Kuklospora colombiana)* registró el valor más bajo con 25,67±4,04 cm. Autores como Zárate et al. (2009) registraron resultados similares en la respuesta de *Melinis minutiflora,* frente a la inoculación con *K. colombiana,* lo que demuestra un efecto inhibitorio al aumento de la longitud radicular (LR) frente a otros inóculos con HFMA, testigos con fertilización química y testigos absolutos (sin aplicación). Estos resultados dan insumos para inferir que el inoculo *K. colombiana* presentó una falta de adaptación a las condiciones presentadas en vivero, por ende, a una baja efectividad en la simbiosis micorrícica de *K. colombiana* (Mahecha-Vásquez et al., 2017).

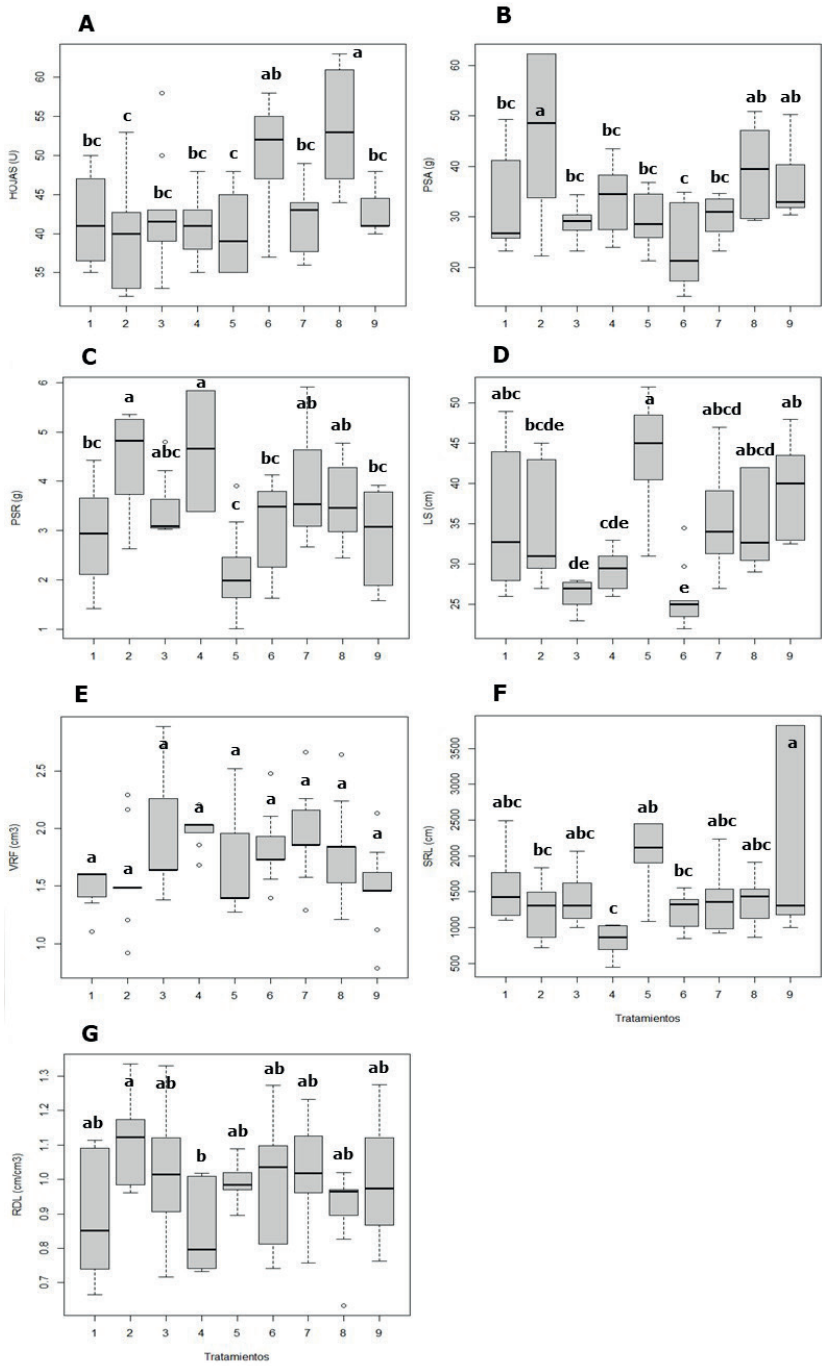


Figura 7 (A, B, C, D, E, F y G). Rasgos funcionales de *Theobroma cacao* (fase de vivero) asociados a inóculos con HFMA. (A) Hojas = número de hojas; (B) PSA = peso seco aéreo; (C) PSR= peso seco radicular; (D) LR = longitud radicular; (E) VRF = volumen de raíces finas; (F) SRL = longitud especifica de raíz; (G) RLD = densidad de longitud de raíz. El rasgo funcional VRF no cumplió con los supuestos de normalidad (Shapiro-Wilk) y homogeneidad (Bartlett).

Fuente: autores.

Para el caso de los rasgos funcionales volumen (VRF) no se observó comportamiento diferencia (p = 0,0631) (Figura 7E). En la mayoría de los tratamientos evaluados se puede observar que los tratamientos con inóculos de HFMA mostraron valores similares o superiores a los testigos con fertilización química, indicando los efectos favorables de la inoculación micorrícica respecto a los testigos no inoculados, considerando la disminución de la fertilización química.

En los registros tomados de la variable de longitud especifica de raíz (SRL) se evidenciaron diferencias significativas (p = 0,0003398) (Figura 7F). Las plántulas sin inoculación y sin fertilización química (Testigo absoluto, T9) mostraron mayores valores respecto a la mayoría de los tratamientos con inóculos de HFMA y fertilización química con 2100,59±1301,14 $cm.g^{-1}$, sin embargo, T5 (*Acaulospora mellea*) presentó el segundo valor más alto (2034,07±461,11 $cm.g^{-1}$), mientras que T4 (*Rhizophagus irregularis*) exhibió el menor valor de SRL (827,33±205,91 $cm.g^{-1}$). Estudios previos han demostrado que las raíces con SRL mayor presentan menor dependencia micorrícica, debido a la estrategia de exploración del suelo en la que se invierte más energía en el aumento de la longitud radicular, respecto a la adaptación del diámetro para permitir una asociación micorrícica eficiente (Bergmann et al., 2020), lo que podría evidenciarse en la relación entre la SRL presentada por las plantas con inóculos de HFMA y su diámetro promedio (DPRF) (Tabla 2). Sin embargo, Ramana et al. (2023) han demostrado que el diámetro promedio no solo va enlazado con la capacidad de la planta de invertir en la expansión del área cortical y su dependencia micorrícica, sino también en la selectividad que presente la raíz a la hora de aceptar un micosimbionte, sugiriendo que raíces finas interactúan con un mayor número de hongos de naturaleza generalista, contrario al caso de *Rhizophagus irregularis*. En el tratamiento inoculado con esta especie se evidenciaron raíces más gruesas y con menor SRL, con un porcentaje de colonización bajo, respecto a los demás tratamientos lo que supone que las raíces más gruesas tienden a ser más específicas en la permisión de la relación micorrícica, contrario al tratamiento absoluto (T9), el cual presentó raíces con mayor longitud especifica, raíces más finas y colonización alta, probablemente de hongos generalistas.

En el caso de la densidad de longitud de raíz (RDL), se observaron diferencias significativas (p = 0,0202) entre los tratamientos (Figura 7G). De los nueve tratamientos, siete presentaron comportamiento similar, excepto T2 y T4. Los valores de las plántulas con el inóculo nativo de Puerto Libertador (T2) fueron mayores con 1,12±0,15 $cm.cm^{-3}$, en contraste con T4 (*Rhizophagus irregularis*), con el menor valor (0,85±0,13 $cm.cm^{-3}$) (Figura 7G). Otros estudios presentaron resultados similares, con comportamiento similar del rasgo funcional densidad de longitud bajo implementación de hongos micorrícicos y sin ellos (Guevara y Guenni, 2013; Ithurrart et al., 2018). Se ha encontrado que este rasgo (RLD) varía en función de la especie y la etapa de desarrollo de planta, la profundidad del suelo, las condiciones edafológicas, entre otros factores (Pascual-Córdova et al., 2023), por lo que, a falta de resultados

que soporten el efecto de los HFMA y su efecto sobre la RDL, no se podría identificar una presión de los inóculos de HFMA en las plántulas de cacao, aun cuando otros estudios han encontrado el efecto de estos simbiontes en la inducción de la planta a incrementar sus raíces laterales al momento de presentarse la asociación micorrícica, con el fin aumentar la exploración del suelo (Méndez et al., 2021; Ahammed & Hajiboland, 2024).

4 CONCLUSIONES

Se evidenció la efectividad simbiótica de las micorrizas arbusculares, indicando un mayor desarrollo de la plántula en función de los micosimbiontes, respecto a los controles con fertilización química. El inóculo que resultó con mejor potencial simbiótico fue el consorcio de HFMA nativo del municipio de Puerto Libertador, seguido de *Rhizophagus irregularis*. De lo anterior se puede inferir que los consorcios de HFMA y de forma individual pueden lograr beneficios en las plántulas de cacao, reflejados en estrategias de crecimiento, captación de nutrientes y preferencia con la raíz, lo cual se evidencia en el aumento de rasgos funcionales como la biomasa aérea, la longitud específica radicular y la densidad de longitud de raíces finas.

Las plántulas en función de inóculos de hongos micorrícicos arbusculares (MA) mostraron un aumento en los valores derasgos funcionales de respuesta (tanto aéreos como radiculares) asociados a una aptitud física óptima para el trasplante a campo. La reducción de la fertilización química sin detrimento del desarrollo de las plántulas evidencia la importancia de la simbiosis micorrícica como herramienta potencial para una producción vegetal más sostenible.

La relación estimada entre los nutrientes y los rasgos funcionales de raíz no es unidireccional, mostrando que un mismo rasgo puede intervenir en la absorción de varios nutrientes. Cabe mencionar que los análisis del tejido foliar de las plantas con micorrizas mostraron mayores registros en el contenido de nutrientes, frente a los testigos con 100 % y 50 % de fertilización química, lo que sugiere una simbiosis exitosa en términos de absorción y contenido de nutrientes en hojas.

Este estudio se puede convertir en una base para futuras aplicaciones del potencial de los HFMA en condiciones de vivero y campo, abriendo brechas poco estudiadas como la de contaminación cruzada de HFMA y micorrizas oportunistas.

CONTRIBUCIÓN DE LA AUTORÍA

Autor 1: redacción del documento, captura de información en campo, tabulación de información, revisión y edición.

Autor 2: director de tesis, metodología, análisis de información, redacción, revisión y edición.

Autor 3: director de tesis, evaluador, revisión y edición documento.

Autor 4: metodología, análisis de información, supervisión del proyecto, investigadora líder, revisión y edición.

Autor 5: metodología, captura de información en campo, construcción de bases de datos, análisis de información, revisión y edición.

Autor 6: metodología, captura de información en campo, procesamiento y análisis de información, revisión y edición.

Autor 7: selección de inóculos HFMA, metodología, revisión y edición.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Agrosavia), al OCAD de Ciencia, Tecnología e Innovación del Sistema General de Regalías y al Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación por la financiación de la investigación en el marco del proyecto "Implementación de tecnologías de producción para el fortalecimiento de la cadena de valor de cacao y la sostenibilidad ambiental del sistema productivo en el departamento de Córdoba".

FINANCIAMIENTO

Los autores agradecen a la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Agrosavia), al OCAD de Ciencia, Tecnología e Innovación del Sistema General de Regalías y al Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación por la financiación de la investigación en el marco del proyecto "Implementación de tecnologías de producción para el fortalecimiento de la cadena de valor de cacao y la sostenibilidad ambiental del sistema productivo en el departamento de Córdoba", presentado en la convocatoria número 18 con el código de proyecto BPIN: 2021000100511.

USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

No aplica

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores manifiestan que no existe ningún conflicto de interés que pueda haber influido en los resultados ni en la interpretación de los datos presentados en este artículo.

LITERATURA CITADA

Abbott, P.C., Benjamin, T.J., Burniske, G.R., Croft, M.M., Fenton, M., Kelly, C.R., Lundy, M., Rodriguez Camayo, F., Wilcox M.D. (2018). An analysis of the supply chain of cacao in Colombia. United States Agency for International Development - USAID. Cali. CO. 208 p.

Ahammed, G. J., & Hajiboland, R. (2024). Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Higher Plants. In Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Higher Plants. https://doi.org/10.1007/978-981-99-8220-2

Anli, M., Boutasknit, A., Ait-El-Mokhtar, M., Ben-Laouane, R., Ait-Rahou, Y., Fakhech, A., & Meddich, A. (2022). Improving Lettuce Yield and Quality of an Agricultural Soil Using a Combination of Arbuscular Mycorrhizal Fungus and Phosphate-Green Wastes Compost. *Gesunde Pflanzen, 74*(1), 205-217. https://doi.org/10.1007/s10343-021-00603-0

Bergmann, J., Weigelt, A., van der Plas, F., Laughlin, D. C., Kuyper, T. W., Guerrero-Ramirez, N., Valverde-Barrantes, O. J., Bruelheide, H., Fresche, G. T., Iversen, C. M., Kattge, J., McCormack, M. L., Meier, I. C., Rillig, M. C., Roumet, C., Semchenko, M., Sweeney, C. J., van Ruijven, J., York, L. M., & Mommer, L. (2020). The fungal collaboration gradient dominates the root economics space in plants. *Science Advances, 6*(27). https://doi.org/10.1126/sciadv.aba3756

Branco, S., Schauster, A., Liao, H. L., & Ruytinx, J. (2022). Mechanisms of stress tolerance and their effects on the ecology and evolution of mycorrhizal fungi. *New Phytologist, 235*(6), 2158-2175. https://doi.org/10.1111/nph.18308

Cherubin, M. R., Franco, A. L. C., Cerri, C. E. P., Oliveira, D. M. da S., Davies, C. A., & Cerri, C. C. (2015). Sugarcane expansion in Brazilian tropical soils-Effects of land use change on soil chemical attributes.

Agriculture, Ecosystems & Environment, 211, 173-184. https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.06.006

Cherubin, M. R., Karlen, D. L., Cerri, C. E. P., Franco, A. L. C., Tormena, C. A., Davies, C. A., & Cerri, C. C. (2016). Soil quality indexing strategies for evaluating sugarcane expansion in Brazil. *PLoS ONE, 11*(3). https://doi.org/10.1371/journal.pone.0150860

Contreras-Santos, J. L., Martínez-Atencia, J., Rodríguez-Vitola, J. L., Barragán-Hernández, W., Garrido-Pineda, J. y Falla-Guzmán, C. K. (2023). Índice de Calidad del Suelo Bajo Sistemas Agropecuarios en el Bosque Seco Tropical-Colombia. *Revista Terra Latinoamericana, 41*. https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1694

Cuadros, G. A. y Gómez, R. (2010). Asociación simbiótica entre hongos micorrízicos arbusculares y el sistema radicular de plántulas de cacao (*Theobroma cacao L.*): efecto de la formononetina y la disponibilidad de fósforo en el suelo. *Ciencia & Tecnología Agropecuaria, 12*(1), 77-85. https://doi.org/10.21930/rcta.vol12_num1_art:217

Demenois, J., Carriconde, F., Bonaventure, P., Maeght, J. L., Stokes, A., & Rey, F. (2018). Impact of plant root functional traits and associated mycorrhizas on the aggregate stability of a tropical Ferralsol. *Geoderma, 312*, 6-16. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.09.033

Di Benedetto, A. y Tognetti, J. (2016). Técnicas de análisis de crecimiento de plantas: su aplicación a cultivos intensivos. RIA. *Revista de Investigaciones Agropecuarias, 42*(3), 258-282. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.redalyc.org/pdf/864/86449712008.pdf

Duarte Hernández, D., Gutiérrez-Rodríguez, E. A., Báez Alonso, N., Klamer de Almeida, G., Pereira Gonzatto, M., Bettio Marodin, G. A. y Belmonte Petry, H. (2019). Manejo de la luz en el cultivo de cacao (*Theobroma cacao L.*). 10.13140/RG.2.2.22753.07523

Gerdemann, J. W., & Nicolson, T. H. (1963). Spores of mycorrhizal Endogone species extracted from soil by wet sieving and decanting. *Transactions of the British Mycological Society, 46*(2), 235-244. https://doi.org/10.1016/s0007-1536(63)80079-0

González García, H., González Pedraza, A. F., Rodríguez Yzquierdo, G., León Pacheco, R., & Betancourt Vásquez, M. (2021). Vigor en plantas de plátano (Musa AAB cv. Hartón) y su relación con características físicas, químicas y biológicas del suelo. *Agronomía Costarricense, 45*(2). https://doi.org/10.15517/rac.v45i2.47772

Guevara, E. y Guenni, O. (2013). Densidad y longitud de raíces en plantas de Leucaena leucocephala (Lam) De Wit. *Multiciencias, 13*(4), 372-380. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.redalyc.org/pdf/904/90430055005.pdf

Hernández-Acosta, E., Trejo-Aguilar, D., Rivera-Fernández, A. y Ferrera-Cerrato, R. (2020). La micorriza arbuscular como biofertilizante en cultivo de café. *Revista Terra Latinoamericana, 38*(3). https://doi.org/10.28940/terra.v38i3.659

Herrera-Monroy, S., Herrera-Monroy, M., & Rivera-Ramírez, J. M. (2023). Revisión sistemática en torno a los hongos micorrízicos arbusculares y su importancia ecológica. *Revista Chapingo Serie Agricultura Tropical, 3*(2), 1-18. https://doi.org/10.5154/r.rchsagt.2022.03.07

Holdridge, L. R. (1982). *Ecología basada en zonas de vida*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, *53*(9).

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM]. (s. f.). Consulta y Descarga de Datos Hidrometeorológicos. http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/

Ithurrart, L. S., Busso, C. A., Torres, Y. A., Peláez, D. V., Giorgetti, H., Rodríguez, G., & Ambrosino, M. L. (2018). Root traits and arbuscular mycorrhiza on perennial grasses exposed to defoliation after a controlled burning. *Phyton-International Journal of Experimental Botany, 87*, 51-59. https://doi.org/10.32604/phyton.2018.87.051

Kaiser, H. F. (1960). The Application of Electronic Computers to Factor Analysis. *Educational and Psychological Measurement, 20*(1). https://doi.org/10.1177/001316446002000116

Kakouridis, A., Hagen, J. A., Kan, M. P., Mambelli, S., Feldman, L. J., Herman, D. J., Weber, P. K., Pett-Ridge, J., & Firestone, M. K. (2022). Routes to roots: direct evidence of water transport by arbuscular mycorrhizal fungi to host plants. *New Phytologist, 236*, 210-221. https://doi.org/10.1111/nph.18281

Katan, J., Greenberger, A., Alon, H., & Grinstein, A. (1976). Solar heating by polyethylene mulching for the control of diseases caused by soilborne pathogens. *Phytopathol, 115*(8V), 683-688. https://apsjournals.apsnet.org/doi/10.1094/Phyto-66-683

Krüger, M., Krüger, C., Walker, C., Stockinger, H., & Schüßler, A. (2012). Phylogenetic reference data for systematics and phylotaxonomy of arbuscular mycorrhizal fungi from phylum to species level. *New Phytologist, 193*, 970-984. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2011.03962.x

Mahecha-Vásquez, G., Sierra, S., & Posada, R. (2017). Diversity indices using arbuscular mycorrhizal fungi to evaluate the soil state in banana crops in Colombia. *Applied Soil Ecology, 109,* 32-39. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2016.09.017

Martínez Castro, C. J., Kido Cruz, M. T., Ureña Castillo, F. D., Zúñiga Marroquín, T. y Aguilar Martínez, C. U. (2022). Indicadores indirectos de bienestar bovino en el municipio de Loma Bonita, Oaxaca, México. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú, 33*(1). https://doi.org/10.15381/rivep.v33i1.20218

Méndez-Gálvez, S., Esquivel-Quispe, R., & Ochoa-Yupanqui, W. W. (2021). Indicadores de colonización de hongos micorrícicos arbusculares en "papa" (Solanum tuberosum L.). *Journal of the Selva Andina Biosphere, 9*(1), 53-63. https://doi.org/10.36610/j.jsab.2021.090100053x

Morton, J. B., Bentivenga, S. P., & Bever, J. D. (1995). Discovery, measurement, and interpretation of diversity in arbuscular endomycorrhizal fungi (Glomales, Zygomycetes). *Canadian Journal Botany, 73*(1), S25-S32. https://doi.org/10.1139/b95-221.

Nath, A., Bhuyan, P., Gogoi, N., & Deka, P. (2023). Pesticides and Chemical Fertilizers: Role in Soil Degradation, Groundwater Contamination, and Human Health. In Singh, R., Singh, P., Tripathi, S., Chandra, K.K., Bhadouria, R. (eds) *Xenobiotics in Urban Ecosystems.* https://doi.org/10.1007/978-3-031-35775-6_7

Pascual-Córdova, G., Palma-López, J. D., Obrador-Olán, J. J., García-López, E., Carrillo-Ávila, E., Sánchez-Soto, S. y Córdova-Sánchez, A. (2023). Diagnóstico nutrimental y distribución de densidad de longitud de raíces finas en Acacia mangium Willd. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios, 10*(1). https://doi.org/10.19136/era.a10n1.3492

Phillips, J. M., & Hayman, D. S. (1970). Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Transactions of the British Mycological Society, 55*(1), 158-161. https://doi.org/10.1016/s0007-1536(70)80110-3

Pulleman, M. M., Rahn, E. y Valle Pilia, J. F. (2024). *Agricultura regenerativa para sistemas cafeteros resilientes y con bajas emisiones de carbono - Una guía práctica* (versión 1.0). Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT).

R Core Team. (2020). R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing.

Ramana, J. V., Tylianakis, J. M., Ridgway, H. J., & Dickie, I. A. (2023). Root diameter, host specificity and arbuscular mycorrhizal fungal community composition among native and exotic plant species. *New Phytologist, 239*, 301-310. https://doi.org/10.1111/nph.18911

Ramírez Gómez, M. M. (2014). *Evaluación de la diversidad de Hongos Formadores de Micorrizas Arbusculares (HFMA) y su relación con el establecimiento de simbiosis con Physalis peruviana* L. [Tesis doctoral, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio Institucional Universidad Nacional de Colombia. https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/47260

Ramos Otiniano, C. C., Hidalgo Rodríguez, J. E. M., Vera Vega, M.Á., Pedro Huaman, J. J., Rodríguez Seminario, C. E. y Chaman Medina, M. E. (2021). Efecto del NaCl y micorrizas (*Rhizophagus irregularis*) en el crecimiento de "tomate" *Solanum lycopersicum L.* (Solanaceae). *Arnaldoa, 28*(3), 675-692. https://dx.doi.org/10.22497/arnaldoa.283.28312

Romero, F. (2023). Contexto de cadena cacao. *Agrosavia*. http://hdl.handle.net/20.500.12324/37966

Rosales Escalon, J. Y., Pérez Ruiz, L. E., Sánchez Gómez, I. y Cruz-Castillo, J. B. (2022). Micorrizas arbusculares y su efecto sobre el desarrollo vegetativo de portainjertos de limón (Citrus limon L.). *Revista Cien-*

tífica La Calera, 22(38), 9-14. https://doi.org/10.5377/calera.v22i38.14152

Schenck, N. C., Spain, J. L., Sieverding, E., & Howeler, R. H. (1984). Several new and unreported vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi (Endogonaceae) from Colombia. *Mycologia, 76*(4), 685-699. https://doi.org/10.1080/00275514.1984.12023899

Schüßler, A., & Walker, C. (2010). *The Glomeromycota: A species list with new families and new genera*. Arthur Schüßler & Christopher Walker, Gloucester, UK. https://www.researchgate.net/publication/285775809_The_Glomeromycota

Sieverding, E., & Oehl, F. (2006). Revision of *Entrophospora* and description of *Kuklospora* and *Intraspora*, two new genera in the arbuscular mycorrhizal Glomeromycetes. *Journal of Applied Botany and Food Quality, 80*(1). https://ojs.openagrar.de/index.php/JABFQ/article/view/2192

Silva-Olaya, A. M., Olaya-Montes, A., Polanía-Hincapié, K. L., Cherubin, M. R., Duran-Bautista, E. H., & Ortiz-Morea, F. A. (2022). Silvopastoral systems enhance soil health in the amazon region. *Sustainability*, *14*(1), 320. https://doi.org/10.3390/su14010320

Suebrasri, T., Seemakram, W., Lapjit, C., Mongkolthanaruk, W., & Boonlue, S. (2023). Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on enhancing growth, fruit quality, and functional substances in tomato fruits (*Lycopersicon esculentum Mill.*). *Journal of Plant Biotechnology, 50*, 239-247. https://doi.org/10.5010/JPB.2023.50.030.239

Unidad de Planificación Rural Agropecuaria [UPRA]. (2023). *Plan de Ordenamiento Productivo para la Cadena de Cacao y su Agroindustria*. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. https://upra.gov.co/es-co/planificacion-del-ordenamiento-agropecuario/poa-nacional/pop/pop-cacao

Velázquez, M. S., Cabello, M. N., Elíades, L. A., Russo, M. L., Allegrucci, N. y Schalamuk, S. (2017). Combinación de hongos movilizadores y solubilizadores de fósforo con rocas fosfóricas y materiales volcánicos para la promoción del crecimiento de plantas de lechuga (*Lactuca sativa L.*). *Revista Argentina de Microbiología, 49*(4), 347-355. https://doi.org/10.1016/j.ram.2016.07.005

Wright, I. J., Reich, P. B., Westoby, M., Ackerly, D. D., Baruch, Z., Bongers, F., Cavender-Bares, J., Chapin, T., Cornellssen, J. H. C., Diemer, M., Flexas, J., Garnier, E., Groom, P. K., Gulias, J., Hikosaka, K., Lamont, B. B., Lee, T., Lee, W., Lusk, C., … Villar, R. (2004). The worldwide leaf economics spectrum. *Nature, 428,* 821-827. https://doi.org/10.1038/nature02403

Zárate Quiroga, L. M., Sánchez de Prager, M. y Barrios, E. (2009). Respuesta de Melinis minutiflora a la inoculación con hongos micorrícico arbusculares en un Inceptisol de Colombia. *Acta Agronómica, 58*(4), 225-233. https://revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica/article/view/12449Zulueta-Rodríguez, R., Gómez-Merino, F. C., Alemán-Chávez, I., Núñez-Camargo, M. del C. y Lara-Cap-

istrán, L. (2020). Respuesta del cultivo de maíz a la bio-inoculación y fertilización química reducida en campo. *Revista Terra Latinoamericana, 38*(3), 597-612. https://doi.org/10.28940/terra.v38i3.656

Conflicto de intereses
Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Licencia de Creative Commons
Revista de Investigación Agraria y Ambiental is licensed under a Creative Commons Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual 4.0 Internacional License.

Fecha de recibido: 25-05-2025
Fecha de aceptado: 01-12-2025
DOI: 10.22490/21456453.9900

INFLUENCIA DE LAS NORMATIVAS EUROPEAS EN LA PRODUCCIÓN Y COMERCIALIZACIÓN DE PASIFLORAS COLOMBIANAS

INFLUENCE OF EUROPEAN REGULATIONS ON THE PRODUCTION AND MARKETING OF COLOMBIAN PASSION FRUITS

Pilar Rojas-Gracia[1]
Vilma Moreno-Melo[2]
Luis Miguel Acosta[3]
Jhon Mario López Alberto[4]

Citación: Rojas-Gracia, P., Moreno-Melo, V., Acosta, L. M. y López, J. M. (2026). Influencia de las normativas europeas en la producción y comercialización de pasifloras colombianas. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental, 17*(2), 41-75.
https://doi.org/10.22490/21456453.9953

[1] Ph. D. Biotecnología, Universidad de Cundinamarca, Fusagasugá, Colombia.
projasg@ucundinamarca.edu.co

[2] Ph. D. Biotecnología Agropecuaria, Universidad de Cundinamarca, Fusagasugá, Colombia
vilma@ucundinamarca.edu.co

[3] MSc. Zootecnista, Universidad de Cundinamarca, Fusagasugá, Colombia.
lmacosta@ucundinamarca.edu.co

[4] MSc. Zootecnista, Universidad de Cundinamarca, Fusagasugá, Colombia.
jmlopez@ucundinamarca.edu.co

RESUMEN

Contextualización: El cultivo y exportación de pasifloras colombianas ha adquirido un papel estratégico en el mercado internacional, debido a su alto valor nutracéutico y al incremento de la demanda europea. Entre 2020 y 2024, Colombia exportó en promedio 13,3 mil toneladas de gulupa anuales, equivalentes a USD 52 millones, siendo la Unión Europea el principal destino (81 % del valor exportado). No obstante, este mercado exige el cumplimiento estricto de normas de inocuidad alimentaria, trazabilidad y límites máximos de residuos (LMR), lo cual ha transformado las dinámicas productivas nacionales.

Vacío de conocimiento: Pese al creciente interés en las frutas de la pasión, existe una limitada sistematización sobre cómo las regulaciones europeas inciden realmente en la producción y comercialización de pasifloras en Colombia. Persisten preguntas abiertas sobre los retos técnicos, económicos y sociales para el cumplimiento regulatorio y cómo estos afectan la competitividad del sector.

Propósito: Analizar cómo las regulaciones europeas han influido en las dinámicas agrícolas y comerciales de los sistemas de producción de pasifloras en Colombia, identificando tanto las principales dificultades como las oportunidades para la innovación, sostenibilidad y acceso a mercados.

Metodología: Se realizó una revisión documental basada en literatura científica actualizada, bases de datos oficiales de insumos agrícolas, normativas internacionales y registros de plaguicidas, con el fin de establecer relaciones entre las regulaciones externas y las prácticas locales.

Resultados y conclusiones: Los hallazgos muestran que las exigencias europeas han promovido cambios técnicos en el uso de agroquímicos, la necesidad de certificaciones y el fortalecimiento de prácticas sostenibles. Se evidenció que actualmente en Colombia existen 22 productos registrados como bioinsumos y 53 plaguicidas con permiso de comercialización y uso. Además, se analizaron los ingredientes activos permitidos por tipo de enfermedad y plaga, y se relacionaron con los LMR exigidos por la Unión Europea. Esta información busca concientizar y actualizar a los productores y asistentes técnicos sobre alternativas viables de manejo fitosanitario que cumplan con las regulaciones internacionales. A pesar de los desafíos, emergen oportunidades como el uso de bioinsumos, la asociatividad y la valorización de subproductos. El cumplimiento de las buenas prácticas agrícolas (BPA) y la consolidación de capacidades técnicas son claves para mantener la competitividad en mercados exigentes y posicionar las pasifloras colombianas como productos de alta calidad y compromiso ambiental.

Palabras clave: agroexportación, fitosanidad, buenas prácticas agrícolas (BPA), seguridad alimentaria, límites máximos de residualidad (LMR).

ABSTRACT

Contextualization: The cultivation and export of Colombian passion fruit have acquired a strategic role in the international market due to their high nutraceutical value and the increasing European demand. Between 2020 and 2024, Colombia exported an average of 13.3 thousand tons of purple passion fruit per year, equivalent to USD 52 million, with the European Union as the main destination (81% of the exported value). However, this market requires strict compliance with food safety standards, traceability, and Maximum Residue Limits (MRLs), which have transformed national production dynamics.

Knowledge gap: Despite the growing interest in passion fruit, there is limited systematization of how European regulations actually affect passion fruit production and marketing in Colombia. Open questions remain about the technical, economic, and social challenges of regulatory compliance and how these influence the competitiveness of the sector.

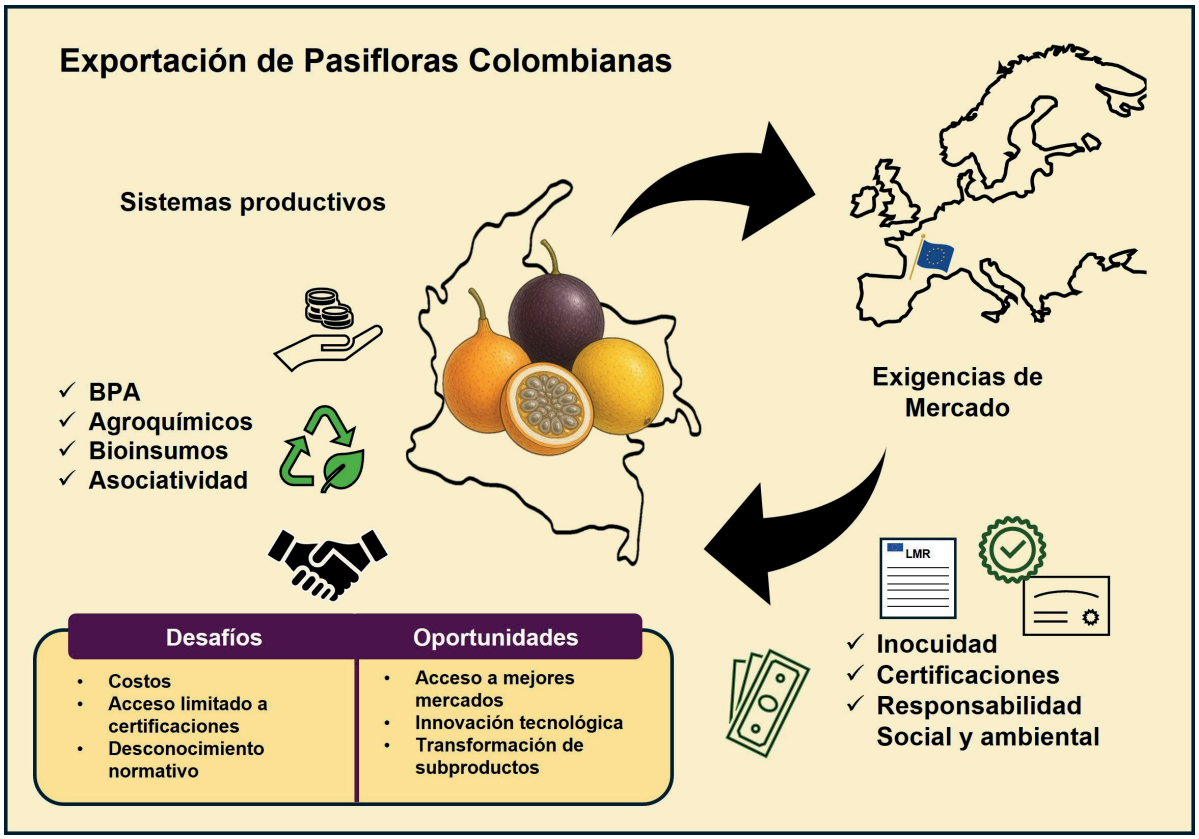
Objective: To analyze how European regulations have influenced the agricultural and commercial dynamics of passion fruit production systems in Colombia, identifying both the main difficulties and the opportunities for innovation, sustainability, and market access.

Methodology: The authors conducted a documentary review based on recent scientific literature, official databases of agricultural inputs, international regulations, and pesticide registrations, in order to establish relationships between external regulations and local practices.

Results and conclusions: The findings show that European requirements have promoted technical changes in the use of agrochemicals, the need for certifications, and the strengthening of sustainable practices. There are currently 22 products registered in Colombia as biological inputs and 53 pesticides with marketing and use permits. In addition, the active ingredients allowed by type of disease and pest were analyzed and related to the MRLs required by the European Union. This information seeks to raise awareness among growers and technical assistants about viable phytosanitary management alternatives that comply with international regulations. Despite the challenges, opportunities emerge, such as the use of biological inputs, associativity, and the valorization of by-products. Compliance with Good Agricultural Practices (GAP) and the consolidation of technical capabilities are key to maintaining competitiveness in demanding markets and positioning Colombian passionflowers as high-quality products with environmental commitment.

Keywords: agroexport, phytosanitary, Good Agricultural Practices (GAP), food safety, Maximum Residue Limits (MRLs)

RESUMEN GRÁFICO



Síntesis de los principales requisitos, desafíos y oportunidades para la exportación de pasifloras colombianas al mercado europeo.

Nota. La representación gráfica fue elaborada con apoyo de inteligencia artificial generativa mediante ChatGPT (OpenAI, 2025).

1 INTRODUCCIÓN

Hoy en día, las cualidades nutricionales y los compuestos fitoquímicos de las frutas y verduras son reconocidos por sus beneficios para la salud cuando se consumen regularmente (Yahia et al., 2018). Dichos beneficios pueden provenir de los productos en fresco, así como de los productos procesados (extractos y aditivos). El caso particular de las pasifloras presenta usos potenciales no solo por su pulpa, sino también por su cáscara y sus semillas, que son fuentes ricas en macronutrientes y micronutrientes esenciales. Numerosos informes destacan sus propiedades, incluyendo actividades antioxidantes, antinflamatorias, antibacterianas y antifúngicas (Araújo et al.,

2024; Da Costa et al., 2023; Huo et al., 2023; Kandandapani et al., 2015). Además, se ha encontrado que presentan componentes como compuestos fenólicos y pectina, entre otros, que son beneficiosos en el manejo de diversas enfermedades, como el asma, la hipertensión, la osteoartritis, la diabetes y la fibrosis pulmonar (Farid et al., 2010; Fonseca et al., 2022; Watson et al., 2008). Este perfil nutricional integral y los beneficios asociados para la salud subrayan la importancia de las pasifloras y el aprovechamiento de todo el fruto, incluyendo la cáscara y las semillas, tanto para fines dietéticos como medicinales.

El género Passiflora, que incluye cerca de 500 especies, es originario principalmente de Sudamérica, aunque también hay especies nativas en Norteamérica, Asia y Oceanía (Faleiro et al., 2019). Las pasifloras más conocidas a nivel comercial son el maracuyá (*yellow passion fruit*) y la gulupa (*purple passion fruit*) (Bernacci et al., 2008). Entre 2015 y 2017, la producción y comercialización de pasifloras fue en promedio de 1,819,000 toneladas, de las cuales 1,241,800 toneladas provinieron de Sudamérica (Altendorf, 2018). En esta región, los principales países productores y comercializadores de fruta fresca son Brasil y Colombia (Leones de Souza & Tañski, 2022; Rudas, 2020). En Colombia, la producción de pasifloras para exportación se ha convertido en un pilar económico importante para departamentos como Antioquia, Cundinamarca, Tolima, Boyacá, Cauca y Huila, siendo el principal destino de la fruta el mercado europeo (Orozco, 2022; Zuluaga, 2015).

Actualmente, los países europeos imponen normativas rigurosas en la producción de alimentos, que deben ser cumplidas en Colombia para poder exportar con éxito. Estas normativas están relacionadas con los estándares de inocuidad alimentaria y, en particular, con los límites máximos de residuos (LMR) de plaguicidas permitidos en los frutos (Orozco, 2022). La estrategia europea "De la granja a la mesa" subraya la necesidad de reducir la dependencia de fertilizantes, pesticidas y sustancias antimicrobianas, así como de incrementar los sistemas productivos orgánicos (European Union, 2020). La Unión Europea (UE) ha establecido la meta de reducir el uso de plaguicidas en un 50 % para 2030, lo que implica un cambio en la gestión agrícola y una reducción máxima en la aplicación de productos fitosanitarios de síntesis química, lo cual tiene un efecto en la economía agraria (Wesseler, 2022).

En 2021, la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA, por sus iniciales en inglés) informó que las pasifloras provenientes de Colombia y otros países productores presentaban residuos de productos químicos, señalando que no se estaban cumpliendo las buenas prácticas agrícolas en el campo (Carrasco Cabrera et al., 2024), lo cual tuvo consecuencias en el cierre de mercados y, en algunos casos, hasta sanciones monetarias por parte de las autoridades competentes. En esta misma línea, las empresas comercializadoras colombianas se alertan ante la emergencia e inician la búsqueda de sistemas productivos que cumplan con los actuales estándares internacionales y que, a su vez, certifiquen la implementación de buenas prácticas agrícolas y la obtención de sellos internacionales. Ante la eventualidad, en enero de 2022, el Instituto Colombiano

Agropecuario (ICA) actualizó la normativa nacional para el registro de lugares de producción, exportadoras y empacadoras de vegetales para la exportación en fresco. Esta normativa enfatiza que los productos deben cumplir con los límites máximos de residuos (LMR) establecidos por los países de destino (ICA, 2022).

A pesar de los esfuerzos realizados por el ICA para socializar la información, aún existe un considerable desconocimiento entre los productores sobre los productos fitosanitarios que pueden ser utilizados en los sistemas productivos de pasifloras y que están permitidos a nivel nacional. Además, muchos productores no están familiarizados con los límites máximos de residuos (LMR) establecidos para cada producto. El objetivo de este documento es analizar cómo las normativas europeas pueden influenciar las prácticas agrícolas, la calidad del producto y las estrategias de mercado de los productores colombianos. Además, se busca proporcionar un referente sobre el cumplimiento de los requisitos fitosanitarios y de seguridad alimentaria exigidos por el mercado europeo, así como explorar las desafíos y oportunidades que estas normativas presentan para el sector de las pasifloras en Colombia.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

Esta revisión bibliográfica se estructuró a partir de fuentes primarias obtenidas de bases de datos científicas especializadas. La búsqueda de literatura se realizó en plataformas como PubMed, Scopus, ScienceDirect, Google Académico, Scielo y en repositorios bibliográficos de universidades nacionales e internacionales. Para garantizar la exhaustividad y relevancia de la información recopilada, se emplearon palabras clave en inglés, tales como *Passion fruit, Pesticide residues in fruit, Maximum residue levels* y *Good agricultural practices*. Adicionalmente, se incorporaron fuentes secundarias que aportaron contexto complementario, incluyendo informes técnicos, normativas nacionales e internacionales y datos estadísticos de entidades gubernamentales, como Agronet (https://www.agronet.gov.co/) y el Mapa Regional de Oportunidades (MARO) (https://www.maro.com.co/). También se consultó la base de datos de productos registrados ante el ICA, a través del listado de bioinsumos y el reporte de plaguicidas químicos de uso agrícola (https://www.ica.gov.co/areas/agricola/servicios/regulacion-y-control-de-plaguicidas-quimicos.aspx), cuya información fue recopilada entre marzo y abril de 2025. Para la identificación de LMR, se utilizó la base de datos de plaguicidas de la Unión Europea, filtrando específicamente el código 0162030 (Passionfruits/maracujas) (https://ec.europa.eu/food/plant/pesticides/eu-pesticides-database/start/screen/products). La búsqueda se realizó en función de los ingredientes activos autorizados en Colombia. Asimismo, para clasificar los ingredientes activos

según su modo de acción, se emplearon los listados oficiales del Comité de Acción contra la Resistencia a Fungicidas (FRAC, por sus iniciales en inglés) y del Comité de Acción contra la Resistencia a Insecticidas (IRAC, por sus iniciales en inglés).

La gestión y organización de la bibliografía se llevó a cabo mediante el uso de Mendeley, un software especializado en la administración de referencias bibliográficas. Posteriormente, se procedió al análisis crítico de la información y a la redacción del presente artículo.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Dinámicas productivas y comerciales de las pasifloras en Colombia

La producción de pasifloras en Colombia representa un recurso estratégico para los departamentos ubicados en la cordillera de los Andes, debido a las condiciones agroecológicas favorables para el cultivo de estas especies. Según datos de Agronet, la red oficial de información y comunicación del sector agropecuario colombiano, entre 2018 y 2022, los principales departamentos productores fueron Antioquia, con un 44 % del total nacional, seguido por Huila (23 %), y en menor proporción Boyacá, Cundinamarca y Tolima, cada uno con un 11 % (Figura 1A). En relación con el tipo de fruta producida y comercializada, entre 2013 y 2022, el maracuyá (*Passiflora edulis* f. *flavicarpa*) lideró consistentemente la producción, seguido por la granadilla (*Passiflora ligularis*), la gulupa (*Passiflora edulis* f. edulis), la curuba (*Passiflora tripartita* var. *Mollissima*), la badea (*Passiflora quadrangularis*) y, en menor medida, la cholupa (*Passiflora maliformis*), cuya producción se encuentra registrada hasta el 2018 (Figura 1B). Esta distribución evidencia tanto la diversificación de especies dentro del género *Passiflora* como las dinámicas productivas diferenciadas por región y especie.

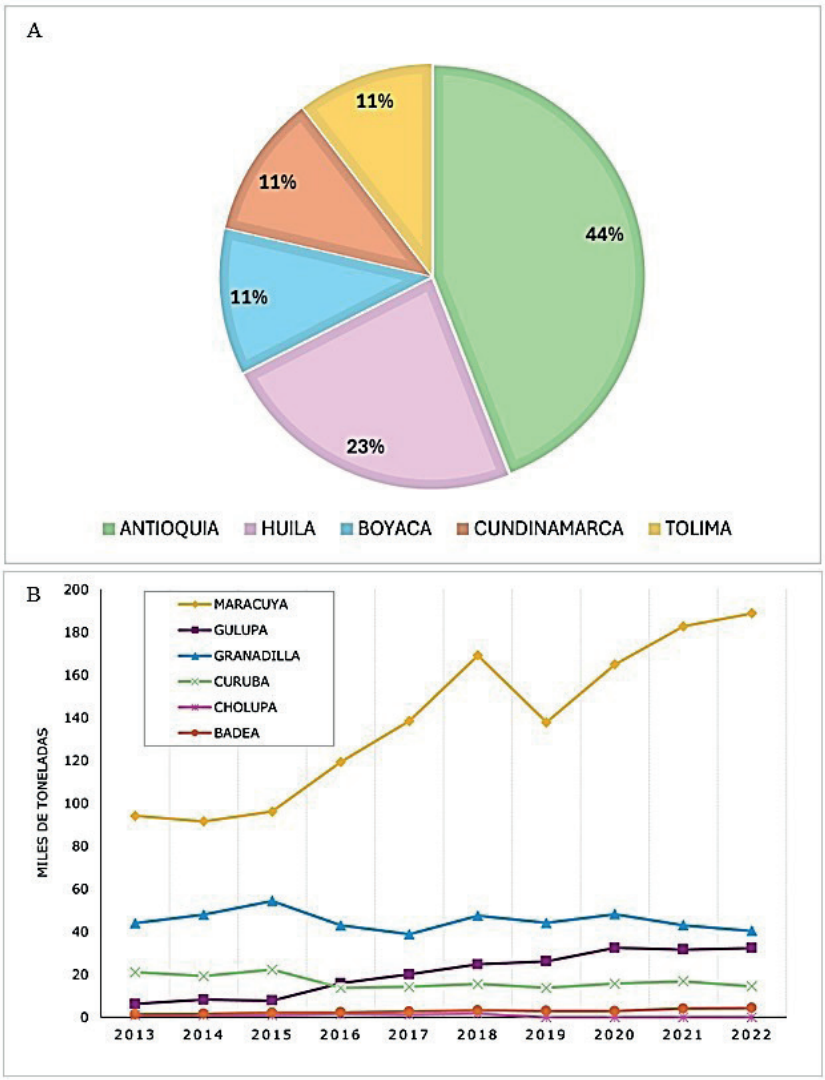


Figura 1. Producción de pasifloras en Colombia. A. Principales departamentos productores (2018-2022) B. Producción total en toneladas de acuerdo con el tipo de pasiflora (2012-2022)

Fuente: datos consultados en Agronet https://www.agronet.gov.co/

La dinámica de comercialización de las frutas de la pasión en Colombia refleja una marcada segmentación entre el mercado nacional y el internacional. A nivel interno, el maracuyá continúa liderando las preferencias de los consumidores, seguido por la granadilla y, en menor proporción, gulupa y curuba, especies ampliamente distribuidas en plazas de mercado y centrales mayoristas del país. Por otro lado, la badea y la cholupa tienen una comercialización limitada y focalizada en regiones específicas, lo que puede atribuirse al bajo nivel de conocimiento y consumo por parte de la población en general, además de factores logísticos y de poscosecha que afectan su circulación comercial.

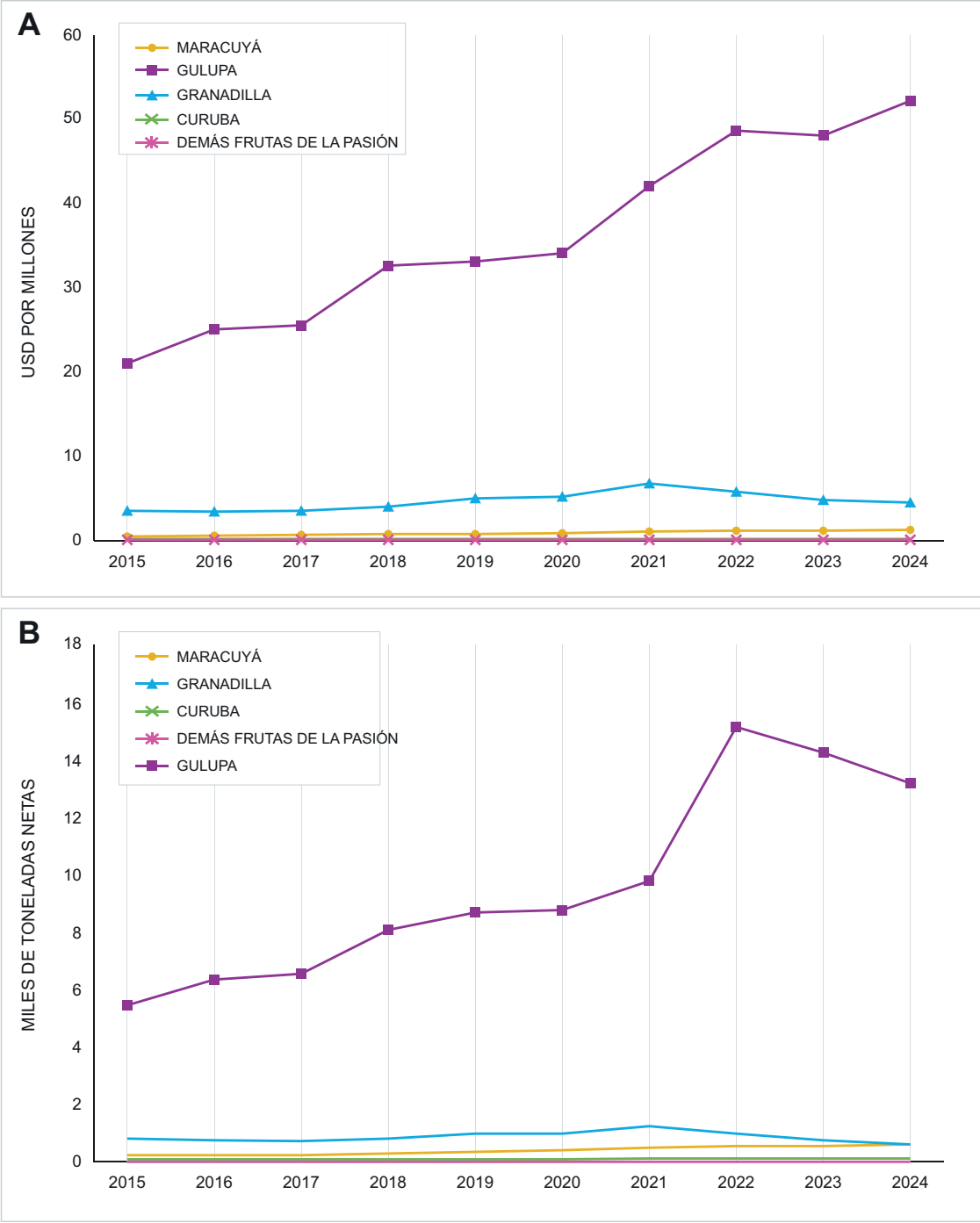


Figura 2. Exportación de pasifloras colombianas. A. Valor histórico de las exportaciones de pasifloras (2015-2024) B. Producción total de acuerdo con el tipo de pasiflora (2015-2024)

Fuente: datos consultados en Mapa Regional de Oportunidades (MARO) https://www.maro.com.co/

Tabla 1.

Principales destinos de pasifloras colombianas (promedio 2020-2024)

Destino		USD FOB	Miles de Ton	Participación (%)
Unión Europea	Países Bajos	$ 38.652.904	10,54	81,0 %
	Bélgica	$ 1.817.916	0,52	4,0 %
	España	$ 796.018	0,17	1,3 %
	Francia	$ 935.555	0,21	1,6 %
	Alemania	$ 819.053	0,19	1,5 %
	Italia	$ 592.428	0,15	1,2 %
Otros destinos	Reino Unido	$ 2.633.649	0,66	5,1 %
	Canadá	$ 1.837.322	0,39	3,0 %
	Emiratos Árabes	$ 767.016	0,12	0,9 %
	Rusia	$ 310.409	0,05	0,4 %

**Datos promedio de 5 años 2020-2024*

Fuente: datos consultados en Mapa Regional de Oportunidades (MARO) https://www.maro.com.co/

En el ámbito internacional, la gulupa se ha consolidado como la principal pasiflora de exportación, debido a su alta demanda en mercados exigentes como la Unión Europea. Según datos del MARO, en el año 2024 las exportaciones de gulupa alcanzaron un valor de USD FOB 52,1 millones, con un volumen de 13,3 mil toneladas (Figura 2A y 2B). Aunque este volumen representa una leve disminución en comparación con el año 2022, el mantenimiento e incluso el incremento del valor unitario de la fruta sugiere un posicionamiento sólido en el mercado internacional y una demanda sostenida por parte de los consumidores.

Entre los principales destinos de exportación se destacan los Países Bajos, Bélgica, España, Francia, Alemania e Italia, que en conjunto representaron el 90,6 % del total exportado entre 2020 y 2024 (Tabla 1). Este patrón evidencia una clara concentración en el mercado europeo, lo cual representa tanto una fortaleza como un riesgo ante posibles fluctuaciones en la demanda regional. A su vez, otros mercados, como Reino Unido, Canadá, Emiratos Árabes Unidos y Rusia, comienzan a mostrar un interés creciente, lo que podría constituir una oportunidad estratégica de diversificación para el sector exportador colombiano.

Atributos de las frutas de la pasión

En el contexto actual de búsqueda por ingredientes funcionales y estrategias de aprovechamiento sostenible de recursos agrícolas, las pasifloras han emergido como productos de alto valor, tanto nutricional como farmacéutico. Aunque tradicionalmente han sido comercializadas por su pulpa, empleada en la elaboración de jugos, néctares y otros productos alimenticios, los subproductos de su procesamiento, especialmente cáscaras y semillas, que representan hasta el 60 % del peso total de la fruta, han cobrado especial relevancia por su contenido en compuestos bioactivos de interés para la salud humana (Khuwijitjaru & Klinchongkon, 2020).

Esta revalorización ha sido impulsada por múltiples estudios que destacan el perfil fitoquímico diverso de *Passiflora edulis* y otras especies, que incluye flavonoides, carotenoides, ácidos fenólicos, fibra dietaria y lípidos funcionales. Dichos compuestos han mostrado efectos antioxidantes, antinflamatorios, antimicrobianos y potencialmente terapéuticos (Fonseca et al., 2022). El extracto de la cáscara, en particular, ha demostrado eficacia clínica en ensayos controlados. En pacientes con osteoartritis de rodilla, la administración oral de 150 mg diarios durante 60 días redujo significativamente el dolor, la rigidez y mejoró la funcionalidad articular; efectos similares se observaron en personas con asma, donde se reportó una reducción significativa de síntomas respiratorios, como tos, sibilancias y disnea (Farid et al., 2010).

Más allá de sus aplicaciones terapéuticas, los residuos de Passiflora están siendo aprovechados como materia prima para la obtención de ingredientes funcionales en la industria alimentaria. Las pectinas extraídas de la cáscara, por ejemplo, han mostrado capacidad para mejorar la viabilidad de microorganismos probióticos, así como incrementar la actividad antioxidante de los alimentos enriquecidos con estos compuestos (Huo et al., 2023; Liang et al., 2022; Watson et al., 2008). Una aplicación destacada es el uso de polvo de cáscara de *Passiflora* como aditivo en yogures de leche de cabra fermentada (GMY, del inglés de *Goat Milk Yogur*), donde su inclusión al 1,0 % mejoró significativamente la textura, la acidez, las propiedades reológicas y sensoriales del producto, además de aumentar su contenido en polifenoles, flavonoides y antocianinas, contribuyendo así a su valor nutracéutico (Liang et al., 2022). Paralelamente, los extractos de aceite de semilla de maracuyá han sido integrados en desarrollos tecnológicos poscosecha. En un estudio reciente, se formularon recubrimientos comestibles basados en nanopartículas de aceite de semilla, quitosano y goma arábiga, que demostraron actividad antifúngica frente a *Colletotrichum siamense* y *Aspergillus niger*, al tiempo que preservaron los parámetros físico-químicos de fresas almacenadas a diferentes temperaturas, posicionándose como una alternativa ecológica a los conservantes sintéticos (Araújo et al., 2024). En conjunto, estos hallazgos confirman que las frutas de la pasión no solo destacan por su valor organoléptico, sino también por su potencial para ser aprovechadas integralmente en productos funcionales.

Buenas prácticas agrícolas y sellos internacionales en el contexto de comercialización de pasifloras

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO, 2004), las buenas prácticas agrícolas (BPA) "consisten en la aplicación del conocimiento disponible a la utilización sostenible de los recursos naturales básicos para la producción, en forma benévola, de productos agrícolas alimentarios y no alimentarios inocuos y saludables, a la vez que se procuran la viabilidad económica y la estabilidad social". Esta definición destaca una triada fundamental para el entendimiento de las BPA, donde se contemplan tres elementos claves: los recursos naturales, el productor y el consumidor (Figura 3). Así, se puede afirmar que las BPA constituyen un conjunto de principios, normas y recomendaciones técnicas que se aplican en las unidades productivas, desde la planeación del cultivo hasta la cosecha, así como en el empaque, en el transporte y en el bienestar de los trabajadores (Quinchanegua Pineda et al., 2019). Estas prácticas están orientadas a asegurar la protección del medio ambiente y los recursos naturales, la protección de la salud humana (tanto del consumidor final como el productor) y la rentabilidad del negocio agrícola.

En Colombia, la adopción de las BPA no es obligatoria, sino que se considera una acción voluntaria. No obstante, aquellos productores que deseen exportar a la Unión Europea, Canadá, Estados Unidos u otros países desarrollados están en la obligación de cumplir con esta normativa (Vásquez Gallo, 2020). Es por esta razón que los productores de pasifloras exportables requieren la implementación de BPA y posterior certificación, con el fin de acceder a estos mercados. Por lo que las BPA se convierten en un factor de competitividad que facilita al productor distinguir su producto frente a otros oferentes.

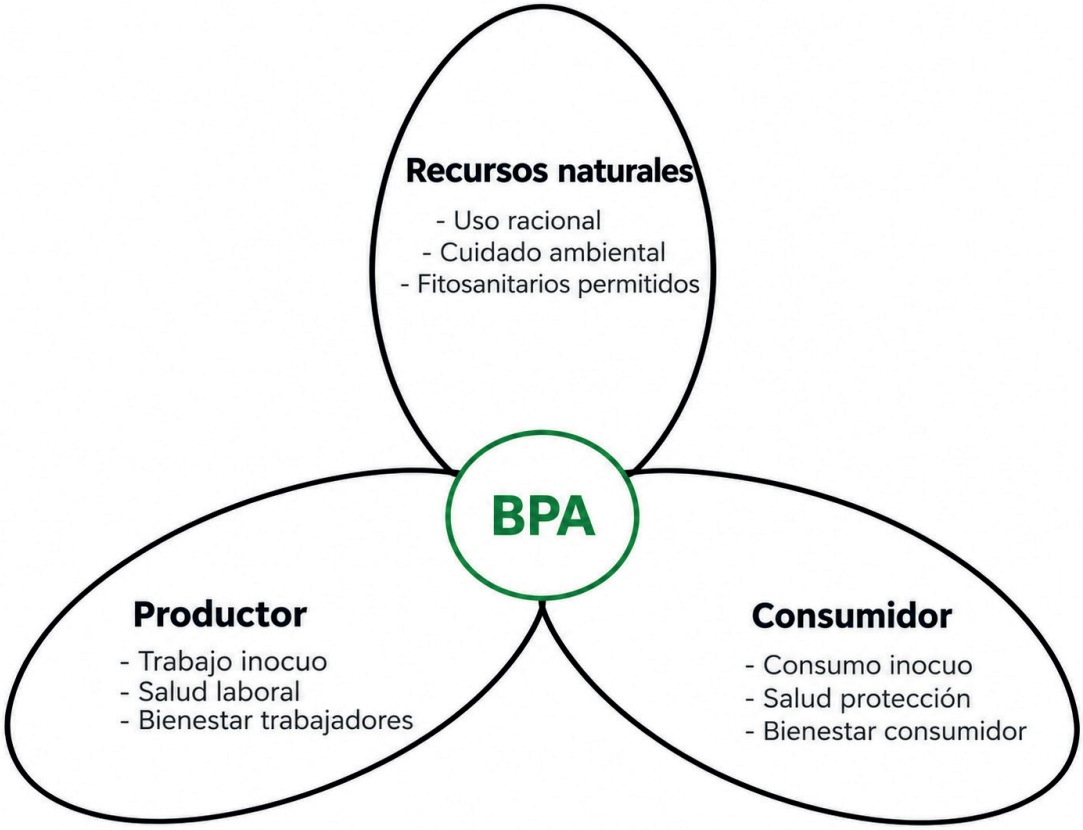


Figura 3. Representación esquemática de la triada fundamental de las buenas prácticas agrícolas (BPA), ilustrando la interacción dinámica entre los recursos naturales, el productor y el consumidor.

Fuente: adaptado de la definición de BPA según la FAO (2004).

Como se mencionó en apartados anteriores, Europa se ha consolidado como el principal destino de exportación para las pasifloras colombianas, lo que subraya la necesidad de cumplir rigurosamente con la normatividad. En este contexto, para acceder a los mercados internacionales, los predios en Colombia deben contar con el certificado de predio exportador, expedido por el ICA (ICA, 2022). A partir del 2022, la normativa nacional para el registro de lugares de producción, exportadoras y empacadoras de vegetales frescos destinados a la exportación fue actualizada, con el objetivo de alinearse con los estándares internacionales. Este cambio respondió a una contingencia surgida en Europa, donde se detectó la presencia de residuos de productos químicos no autorizados en pasifloras colombianas, situación atribuida al incumplimiento de las BPA (Carrasco Cabrera et al., 2024). Por esta razón, la adopción y verificación de las BPA constituye un requisito indispensable para obtener la certificación como predio exportador y, por ende, para comercializar pasifloras en el mercado exterior.

Adicionalmente, más allá de las regulaciones oficiales, el acceso a mercados de alto valor depende, en muchos casos, de la adopción de certificaciones privadas de calidad, tales como GlobalGAP, Rainforest Alliance, Fairtrade, entre otros. Aunque estos estándares comparten principios fundamentales con la normativa gubernamental, incorporan requisitos adicionales con distintos niveles de especificidad, según el sello que se desee obtener. La implementación de estas certificaciones es voluntaria y responde, principalmente, a las exigencias del mercado de destino. Actualmente, las comercializadoras europeas exigen como condición mínima la certificación GlobalGAP, lo que representa un desafío considerable para las exportadoras colombianas, quienes deben asegurar un suministro constante por parte de productores certificados.

GlobalGAP

GlobalGAP es considerado uno de los estándares más relevantes del sector agroalimentario a nivel mundial, y se ha consolidado como una condición casi indispensable para el acceso a mercados de alto valor (Fiankor et al., 2020). La obtención de esta certificación resulta atractiva, debido al potencial incremento en la rentabilidad; sin embargo, su implementación implica costos significativos relacionados con la adecuación de los sistemas productivos, auditorías periódicas y procesos de recertificación, factores que limitan su adopción entre pequeños productores. Además, el cumplimiento de los estrictos requisitos de GlobalGAP, incluyendo puntos de control asociados con la inocuidad alimentaria, la trazabilidad, la sostenibilidad ambiental y la salud y seguridad ocupacional, puede constituir una barrera importante para este segmento.

Asimismo, existen otros estándares que, si bien no son imprescindibles para la exportación, pueden darles un valor agregado diferencial a las frutas de la pasión. Entre ellos destaca Rainforest Alliance, cuyo enfoque se centra en la conservación de la biodiversidad y la promoción de medios de vida sostenibles a través de la transformación de prácticas agrícolas, estrategias empresariales y comportamientos de consumo (Newsom & Milder, 2018). La adopción de este estándar implica, entre otros aspectos, el uso de fertilizantes orgánicos y la implementación de herramientas para el control biológico, lo que requiere un cambio de mentalidad, tanto por parte del productor como de sus trabajadores.

Fairtrade

El sello Fairtrade promueve principios de sostenibilidad con un enfoque integral en el bienestar de los productores, poniendo especial énfasis en la promoción de condiciones laborales dignas. Uno de los pilares fundamentales de Fairtrade es la reducción de la pobreza a través de la promoción de un comercio más justo (Fairtrade, 2024). De manera similar, la certificación GRASP (Evaluación de Riesgos en Prácticas Sociales), un módulo complementario de GLOBALG.A.P., se orienta a verificar el cumplimiento de normas laborales específicas dentro del sector agrícola (GLOBALGAP, 2022).

Otro referente importante en esta línea es Sedex SMETA (Sedex Members Ethical Trade Audit), una auditoría reconocida internacionalmente que permite evaluar estándares laborales, condiciones de salud y seguridad, desempeño ambiental y ética empresarial, tanto en las operaciones propias como en las de proveedores (Sedex, s.f.).

Aunque estas certificaciones no son estrictamente requeridas para la exportación de pasifloras, su obtención constituye una estrategia clave para fortalecer la competitividad de los productores colombianos y mejorar su posicionamiento en nichos de mercado con alta conciencia social y ambiental, pues existe una creciente demanda de consumidores europeos por productos que garanticen prácticas laborales justas y responsabilidad social, lo cual refuerza la importancia de adoptar estos sellos de calidad. En este contexto, un estudio demostró que las principales razones por las cuales las personas eligen consumir de manera responsable son el cuidado de su propio bienestar y el de su familia, así como un sentido de responsabilidad hacia lo que ocurre en el mundo (Pauzuoliene et al., 2023).

Sin embargo, la aplicación de estos estándares representa un desafío considerable para los pequeños productores. El acceso a certificaciones como Fairtrade, GRASP o SMETA suele verse limitado debido a los altos costos asociados a los procesos de capacitación, implementación de mejoras productivas, auditorías internas y certificaciones externas. Esta situación ha impulsado un modelo de adopción colectiva, en el cual la afiliación a gremios, asociaciones o cooperativas de productores permite compartir los costos y facilitar el cumplimiento de los requisitos establecidos. Así, las agremiaciones se convierten en una vía estratégica para la integración de pequeños productores al comercio internacional, bajo estándares de sostenibilidad. El fortalecimiento de las organizaciones de base y el trabajo colectivo no solo facilitan la obtención de certificaciones, sino que también potencian el acceso a mercados de alto valor y ofrecen una oportunidad para añadir valor agregado a las frutas de la pasión colombianas. En este sentido, promover la asociatividad entre pequeños productores resulta esencial para ampliar las oportunidades de inserción competitiva en los mercados globales.

Uno de los problemas que enfrentan los productores de pasifloras es que, al vender a través de intermediarios, no tienen la capacidad de fijar el precio de su propia producción. Esto se debe a que el precio en el mercado mayorista fluctúa en función de la oferta y la demanda. La demanda de pasifloras está sujeta a variaciones estacionales, con los meses de mayor demanda concentrados en abril, mayo, septiembre y octubre (Minagricultura, 2012). En este contexto, las exportadoras colombianas podrían estar implementando un modelo de agricultura por contrato a largo plazo con grupos de agricultores, un modelo que ya ha sido adoptado con éxito en otros países. Un ejemplo de ello es el caso de la empresa SWIFT Company Ltd., en Tailandia, que ha implementado este modelo durante más de 20 años. Los productores de las fincas contratadas por esta empresa cumplen con los más altos estándares de inocuidad alimentaria y calidad, y poseen certificaciones como GlobalGAP,

Sedex SMETA, además de otras relacionadas con la producción libre de agroquímicos y la agricultura orgánica (Suthavivat, 2019). Lo más relevante de este modelo es que se establece un precio fijo durante la vigencia del contrato, independientemente de las fluctuaciones del mercado. De esta manera, todos los actores en la cadena de valor de las pasifloras pueden beneficiarse de un marco de estabilidad y previsibilidad en los precios.

En resumen, tanto las BPA como las certificaciones internacionales juegan un papel fundamental en la comercialización de pasifloras colombianas, ya que no solo garantizan la calidad e inocuidad del producto, sino que también facilitan el acceso a mercados internacionales altamente competitivos. Aunque la adopción de las BPA es voluntaria en Colombia, su implementación es crucial para acceder a mercados como el de la Unión Europea y otros destinos internacionales. Las certificaciones adicionales, como GlobalGAP, Rainforest Allience, Fairtrade, GRASP y Sedex SMETA, ofrecen un valor agregado, mejorando la competitividad de los productores colombianos en nichos de mercado que priorizan la sostenibilidad y la responsabilidad social. Sin embargo, el acceso a estas certificaciones representa un desafío para los pequeños productores, debido a los altos costos asociados. En este sentido, la asociatividad y la implementación de modelos de agricultura por contrato pueden ser clave para superar estas barreras, permitiendo a los productores compartir los costos y acceder a mercados de alto valor, fortaleciendo así la competitividad de las pasifloras colombianas en el mercado global.

Influencia de las estrategias de control fitosanitario en la inocuidad de las frutas de la pasión

Un aspecto clave en la implementación de BPA es el desarrollo de estrategias eficaces para el control de plagas y enfermedades, ya que de ello depende no solo la producción y rentabilidad del cultivo, sino también la calidad e inocuidad del producto final. Un adecuado manejo de plagas y enfermedades bajo BPA incluye prácticas de planeación, prevención y monitoreo constante para la detección temprana de problemas fitosanitarios, así como estrategias de control, tanto culturales como químicas. Para la planeación y monitoreo, es fundamental identificar los síntomas y signos de enfermedades, además de establecer trampas que permitan al productor detectar la presencia de plagas en el cultivo. En este apartado, se analizan las estrategias actuales para el control de enfermedades y plagas en el cultivo de pasifloras, relacionándolas con la seguridad alimentaria y la producción de productos inocuos, que son aspectos clave en la implementación de las buenas prácticas agrícolas en los sistemas de producción. Además, se revisa la normatividad vigente, los productos fitosanitarios autorizados en Colombia, y los límites máximos de residuos permitidos en la Unión Europea, el principal mercado para las frutas exóticas colombianas.

Manejo de enfermedades

Diversos estudios han identificado y caracterizado las principales enfermedades que afectan a las pasifloras. Entre ellas, destaca la Fusariosis, causada por las especies *Fusarium oxysporum* y *F. solani* (Ortiz y Hoyos, 2013), que afecta los haces vasculares de la planta y puede desarrollarse en todas sus etapas fenológicas, desde la plántula hasta las plantas en producción. En cuanto al control de esta enfermedad, no existen tratamientos curativos, por lo que el manejo debe ser preventivo, iniciando antes de la siembra. El material vegetal utilizado es un factor crítico, ya que la susceptibilidad de las pasifloras de interés agronómico es alta. Por esta razón, se emplean plantas injertadas, donde el patrón proviene de variedades tolerantes al patógeno (Ocampo et al., 2022; Patiño-Pacheco y Pérez-Cardona, 2021).

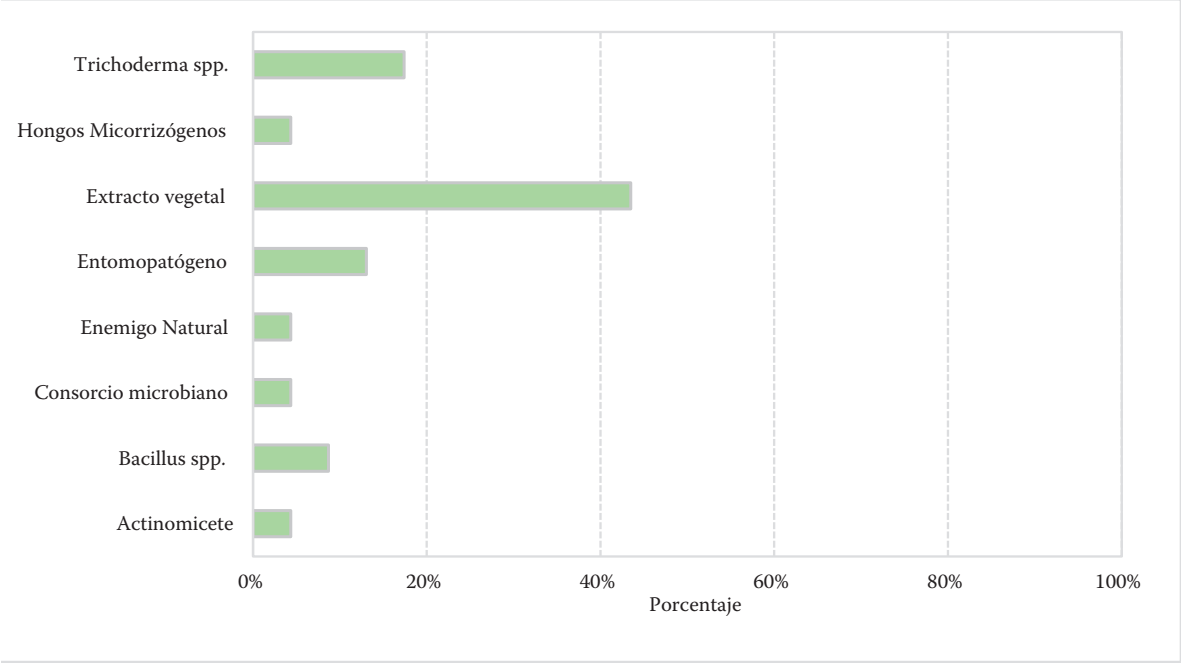
Respecto al control químico, es posible la aplicación de productos fitosanitarios de amplio espectro antes de la siembra, como una estrategia para reducir la carga microbiana en el suelo. No obstante, resulta fundamental realizar una posterior inoculación con microorganismos benéficos, entre los cuales se destacan diversas especies del hongo *Trichoderma* (Quiroga-Rojas et al., 2012; Wang et al., 2023) y del género bacteriano *Bacillus* (Chen et al., 2021; Ye et al., 2021). En este sentido, existen nuevas alternativas de manejo que minimizan el impacto ambiental, entre las cuales se destacan los bioinsumos. Estos productos biológicos, diseñados para el control de plagas y enfermedades, se basan en microorganismos y extractos naturales, y representan una opción efectiva y sustentable para reducir la dependencia de productos químicos sintéticos.

En este contexto, los bioinsumos surgen como alternativas de manejo más sostenibles, con un menor impacto ambiental. Estos productos biológicos, formulados a base de microorganismos y extractos naturales, se utilizan para el control de plagas y enfermedades, representando una opción efectiva para disminuir la dependencia de agroquímicos sintéticos. De acuerdo con la consulta realizada en abril de 2025 en el Sistema de Registro de Bioinsumos del ICA, se encuentran registrados 22 productos clasificados como bioinsumos, número que se actualiza de manera periódica. De estos, cinco productos (aproximadamente 18 %) contienen especies de *Trichoderma*, tales como *T. harzianum*, *T. koningii*, *T. viride*, *T. asperellum*, *T. atroviride* y *T. koningiopsis*. Asimismo, tres productos (9 %) incluyen cepas del género *Bacillus*, como *B. subtilis* y *B. amyloliquefaciens* (Figura 4). Adicionalmente, existen otros inoculantes disponibles para el enriquecimiento de la microbiota del suelo, entre los cuales destacan los hongos micorrizógenos, los consorcios microbianos y los actinomicetos. Estos bioinsumos amplían las alternativas para promover la sanidad vegetal mediante estrategias de control biológico.

Por otro lado, el extracto del árbol de té (*Melaleuca alternifolia*) ha sido reportado como una herramienta eficaz para el manejo preventivo de *Fusarium oxysporum*. Es importante enfatizar que su aplicación se orienta principalmente a estrategias preventivas, dado que en otras especies vegetales se

ha demostrado que el extracto de *M. alternifolia* induce resistencia sistémica contra la marchitez vascular en banano (*Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* Race 1) y reduce la infección causada por *Xanthomonas campestris* en tomate (Dalio et al., 2020).

Figura 4. Bioinsumos comercializados en Colombia con registro para pasifloras, mostrando el porcentaje correspondiente a diferentes géneros o grupos funcionales empleados para el control biológico



Fuente: adaptado del listado de bioinsumos registrados ante el ICA (abril de 2025) (ICA, 2025).

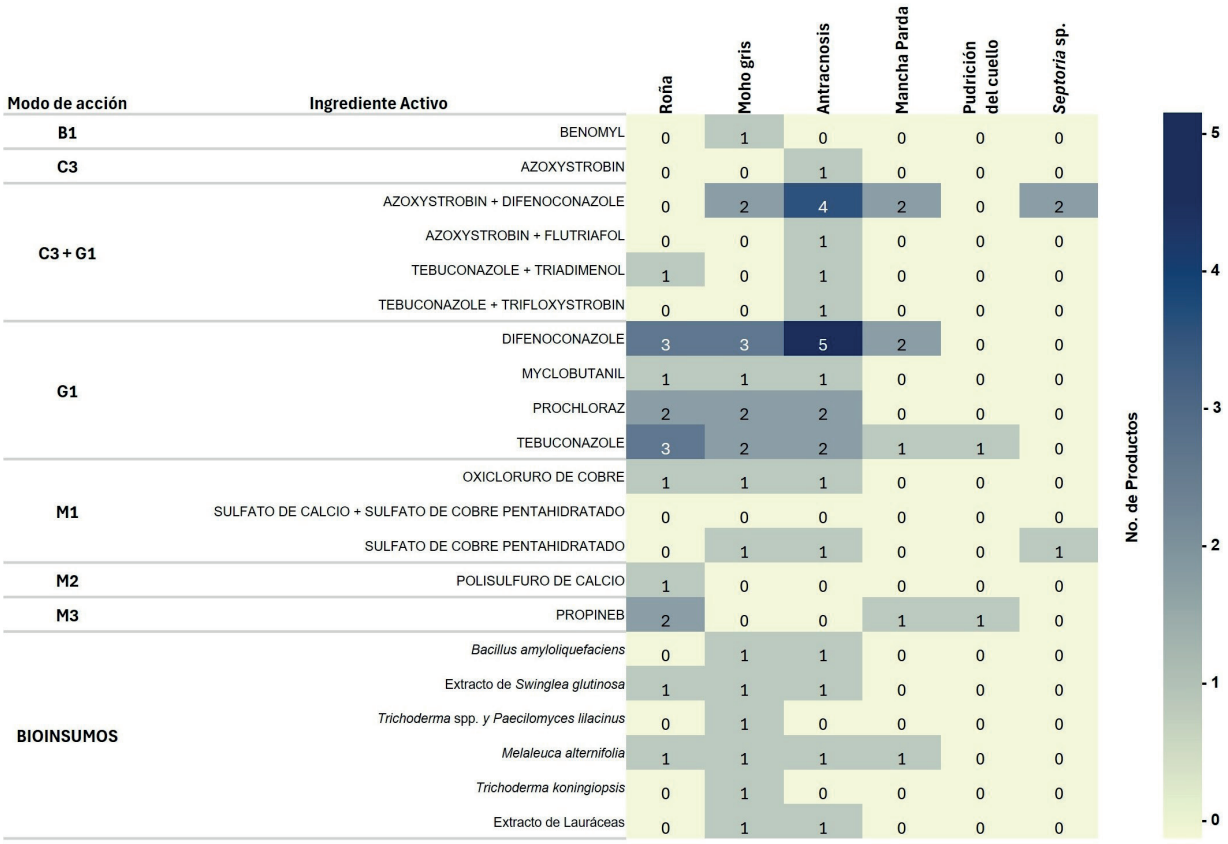
A nivel de poscosecha, las enfermedades más comunes que limitan la comercialización de maracuyá, gulupa y otras pasifloras son aquellas que afectan directamente a los frutos, ya que alteran su apariencia. Entre estas enfermedades se incluyen la roña, causada por el hongo *Cladosporium cladosporioides* (Delgado-Méndez et al., 2013; Riascos et al., 2012), las enfermedades blandas provocadas por patógenos como *Phytophthora spp.* y *Colletotrichum spp.*, también llamada antracnosis (Gil et al., 2017; Orjuella Barquero et al., 2011) y la bacteriosis o mancha de aceite, originada por bacterias del género *Xanthomonas spp.* (Benítez et al., 2011). Estos problemas fitosanitarios representan una pérdida económica considerable durante la comercialización, ya que los frutos afectados son rechazados por el mercado.

El primer mecanismo de control fitosanitario en campo para mitigar la diseminación de estas enfermedades consiste en la eliminación cultural de hojas y frutos infectados. Esta estrategia es especialmente relevante en el caso de la bacteriosis, para la cual no existen productos fitosanitarios autorizados para su control en Colombia. En etapas pos-

teriores, el manejo de enfermedades fúngicas se complementa mediante la aplicación de productos fitosanitarios específicos. En este contexto, el ICA actualiza periódicamente el registro de plaguicidas autorizados en Colombia. Según la consulta realizada en abril de 2025, se encuentran registrados 53 plaguicidas químicos de uso agrícola para pasifloras, de los cuales el 45 % corresponde a fungicidas (Figura 5).

De los 28 productos fungicidas registrados, la enfermedad antracnosis causada por Colletrotrichum gloesporioides es la que reporta un número mayor de productos para su control, seguido por la enfermedad llamada roña, causada por Cladosporium cladosporioides y moho gris, causada por Botrytis cinérea. Como se puede observar en la figura 5, la mayoría de los productos para el control de dichas enfermedades contienen ingredientes activos, cuyo modo de acción corresponde a la inhibición de la biosíntesis de esteroles en las membranas celulares del patógeno, clasificados bajo el grupo G1 según el código FRAC. Los inhibidores de la biosíntesis de esteroles (SBI, por sus iniciales en inglés), en particular los inhibidores de desmetilación (DMI, por sus iniciales en inglés), constituyen un grupo fundamental de fungicidas que representan aproximadamente un tercio del uso mundial en diversos cultivos y enfermedades. Los fungicidas DMI se destacan por varias propiedades únicas, entre ellas su amplio espectro de eficacia, comportamiento sistémico (absorción y translocación dentro de los tejidos vegetales) y actividad curativa, lo que los convierte en herramientas indispensables en la agricultura convencional (Verweij et al., 2020). En cultivos de pasifloras, los fungicidas del grupo de los inhibidores de la desmetilación se utilizan eficazmente para el control de fitopatógenos responsables de enfermedades de gran importancia económica. Como se muestra en la figura 5, un mismo ingrediente activo puede ser empleado para el manejo de múltiples enfermedades, tal como ocurre con el azoxystrobin y el difenoconazole, utilizados contra dos o más agentes patógenos. Además, se observa que la mayoría de los productos disponibles se agrupan dentro de las categorías G1 y C3.

Figura 5. Modos de acción e ingredientes activos de fungicidas y bioinsumos registrados en Colombia para pasifloras.



Fuente: datos tomados de la base de datos de productos permitidos por el ICA (ICA, 2025)

Aunque el riesgo de desarrollo de resistencia de los patógenos a los fungicidas DMI es considerado relativamente bajo, el uso repetido de aplicaciones consecutivas sin alternancia de modos de acción distintos puede incrementar la selección de poblaciones tolerantes. Por ello, los programas de manejo integrado de enfermedades deben incorporar estrategias de rotación espacio-temporal de fungicidas basadas en diferentes modos de acción, con el objetivo de minimizar la aparición de resistencias específicas a los DMI (He et al., 2019). Adicionalmente, esta estrategia contribuye a reducir la acumulación de residuos químicos en los frutos, asegurando el cumplimiento de los límites máximos de residuos (LMR) exigidos, condición indispensable para garantizar la aceptación del producto en los mercados internacionales. En la tabla 2 se muestran los LMR permitidos por la Unión Europea de los ingredientes activos de fungicidas que actualmente están permitidos en Colombia.

Tabla 2.
Límites máximos de residualidad (LMR) de ingredientes activos de fungicidas para pasifloras, establecidos por la Unión Europea

FUNGICIDAS	LMR UE (mg/kg)
Azoxystrobin	4
Benomyl	0,1
Difenoconazole	0,1
Flutriafol	0,01
Myclobutanil	0,01
Oxicloruro de cobre	20
Polisulfuro de calcio	N/A
Prochloraz	0,03
Propineb	0,05
Sulfato de calcio	N/A
Sulfato de cobre pentahidratado	N/A
Tebuconazole	1
Triadimenol	0,01
Trifloxystrobin	0,01

Nota: *N/A indica que el LMR no está definido o no aplica bajo el marco de regulación actual de la UE.*

Fuente: datos tomados de la base de datos de plaguicidas de la UE.

En esta línea de evitar la acumulación de residuos de fungicidas sintéticos, se promueve la rotación con bioinsumos para el manejo de enfermedades como la roña, la antracnosis y la botrytis. Dentro de las alternativas registradas se encuentran microorganismos de control biológico como *Bacillus amyloliquefaciens* y *Trichoderma* spp., así como extractos vegetales de la familia *Lauraceae*, *Melaleuca alternifolia* (árbol de té) y *Swinglea glutinosa* (Figura 5). Estos últimos han demostrado tener un efecto inhibitorio a nivel *in vitro* frente a varios patógenos, incluyendo *Fusarium oxysporum* y *Colletotrichum* sp (Camargo Piñeres et al., 2021; Paramalingam et al., 2023). Es fundamental que el uso de estas estrategias se implemente de manera preventiva, especialmente bajo con-

diciones de humedad y temperatura que favorecen la aparición de enfermedades. Una vez el patógeno se ha establecido en el cultivo, la eficacia de estos productos puede disminuir considerablemente, lo que podría generar escepticismo por parte del productor, respecto a su efectividad como herramienta de manejo.

Manejo de plagas

Las pasifloras son susceptibles al ataque de diversos insectos y otros artrópodos que afectan de manera significativa la productividad y calidad de los frutos. Los productos permitidos por el ICA se listan en la figura 6, donde aparecen los ingredientes activos y su clasificación del modo de acción, según IRAC (del inglés *Insecticide Resistance Action Committee*). El Comité de Acción para la Resistencia a los Insecticidas (IRAC) es una asociación internacional de empresas de protección de cultivos. El IRAC actúa como grupo técnico especializado dentro de CropLife International, centrado en garantizar la eficacia a largo plazo de los productos para el control de insectos, ácaros y garrapatas, mediante un manejo eficaz de la resistencia para la agricultura sostenible y la mejora de la salud pública (Sparks & Nauen, 2015).

Entre los insectos plaga de mayor importancia en los cultivos de pasifloras se destacan los trips, particularmente Neohydatothrips signifer y especies del género Frankliniella (López et al., 2022; Sandoval-Cáceres y Cruz-Castiblanco, 2024). *N. signifer* ha sido identificado como una amenaza significativa en los sistemas productivos de maracuyá, con reportes de daño que afectan hasta el 95 % de los terminales vegetativos, comprometiendo severamente el desarrollo foliar y la productividad de las plantas (Monje et al., 2012).

En Colombia, el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) ha registrado 11 plaguicidas y 9 bioinsumos para el manejo de trips (Figura 6). Entre los ingredientes activos disponibles se destacan *spinetoram* y *spinosad*, los cuales pertenecen al grupo de las espinosinas y actúan sobre los receptores nicotínicos de acetilcolina. Estudios realizados en Florida (Estados Unidos) han confirmado la eficacia de ambos compuestos contra poblaciones de *Frankliniella* spp., por lo que se recomiendan como opciones viables dentro de esquemas de rotación de insecticidas para evitar la generación de resistencia (Ataide et al., 2024; Renkema et al., 2020).

Otro ingrediente activo utilizado en el manejo de trips es el acetamiprid, neonicotinoide que actúa sobre el sistema nervioso central (Renkema et al., 2020). En Colombia, este producto se comercializa en mezclas formuladas con pyriproxyfen (regulador de crecimiento) y con cypermethrin (piretroide de amplio espectro). Sin embargo, el uso de este último ingrediente activo requiere especial atención, ya que estudios recientes sobre residualidad en pasifloras han reportado niveles de residuos totales en el fruto de hasta 0,366 mg/kg, con una mayor acumulación en la cáscara que en la pulpa (Mozzaquatro et al., 2022), lo cual excede el LMR establecido por la Unión Europea (Tabla 3). Una problemática similar se presenta con las moléculas imidacloprid, otro neonicotinoide

ampliamente utilizado y bifenthrin, un piretroide; ambos también superaron los LMR en pasifloras originarias de Colombia con valores de 0,047 y 0,029 mg/Kg, respectivamente (European Comission, 2024; Mozzaquatro et al., 2022). Dado este contexto, es crucial respetar las dosis recomendadas y los periodos de carencia especificados en las fichas técnicas de cada producto, ya que aumentos o reducciones no autorizadas en la dosis pueden conducir a consecuencias contraproducentes. En primer lugar, el aumento de la dosis puede llevar a la acumulación de producto en el tejido vegetal y, por otro lado, una reducción de la dosis puede influir en una menor eficacia de control, mayor supervivencia de las poblaciones objetivo y, eventualmente, un aumento en la tasa de reproducción de los sobrevivientes, fenómeno que puede acelerar la evolución de resistencia a insecticidas o inducir un resurgimiento poblacional. En apoyo a este planteamiento, Un estudio experimental de Cao et al. (2019) evidenció que la exposición de adultos parentales a dosis subletales de imidacloprid (LC_{10} = 56,8 mg/L y LC_{25} = 79,2 mg/L), seguida por la misma exposición en la generación F_1, provocó un aumento significativo en la tasa reproductiva de los sobrevivientes (Cao et al., 2019). Este fenómeno implica que la subdosificación no solo disminuye la eficacia del control, sino que también puede acelerar procesos de resistencia y provocar resurgencias poblacionales.

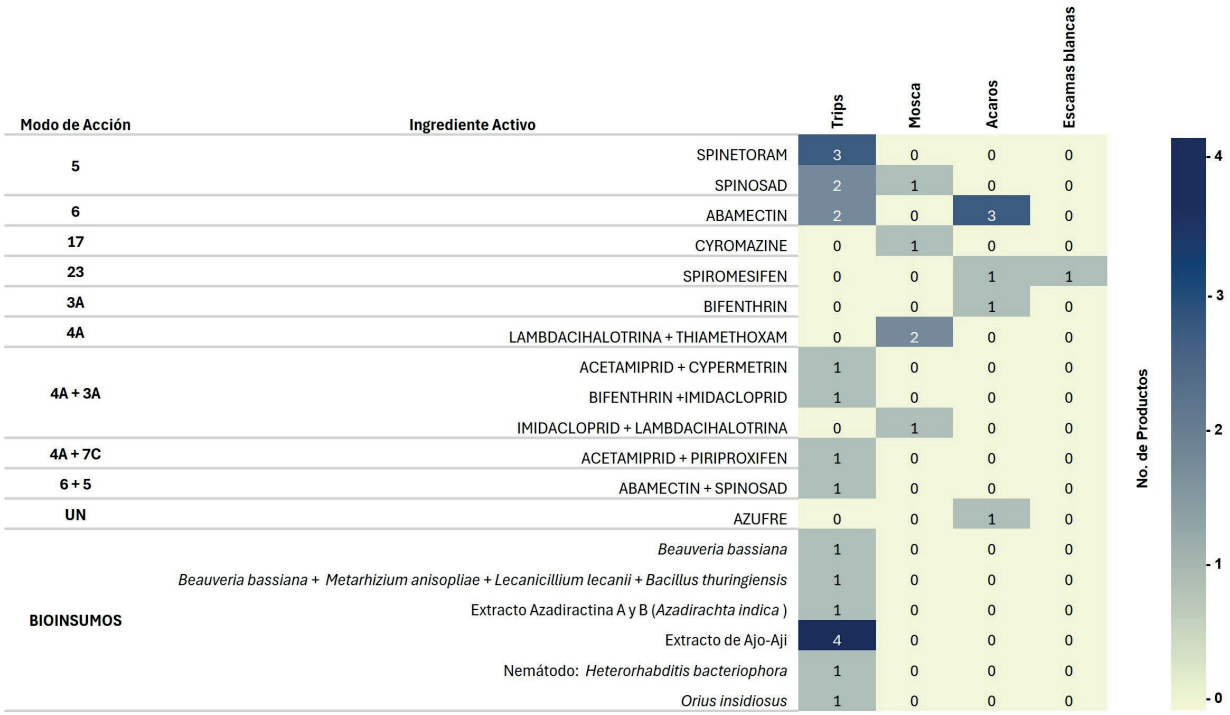


Figura 6. Modos de acción e ingredientes activos de insecticidas y bioinsumos registrados en Colombia para pasifloras

Fuente: datos tomados de la base de datos de productos permitidos por el ICA (ICA, 2025).

Tabla 3.

Límites máximos de residualidad (LMR) de ingredientes activos de insecticidas para pasifloras, establecidos por la Unión Europea

INSECTICIDA	LMR
Abamectin	0,01
Acetamiprid	0,01
Azufre (un)	0
Bifenthrin	0,01
Cypermetrin	0,05
Cyromazine	0,01
Imidacloprid	0,01
Lambdacihalotrina	0,01
Piriproxifen	0,01
Spinetoram	0,4
Spinosad	0,7
Spiromesifen	1
Thiamethoxam	0,01
Azadiractina *	0,01

**Ingrediente activo de extracto de neem.*

Fuente: datos tomados de la base de datos de plaguicidas de la UE.

El uso de bioinsumos representa una herramienta valiosa para el manejo de trips en cultivos de pasifloras. Entre los productos comúnmente empleados se incluyen extractos de ajo-ají, hongos entomopatógenos, nematodos entomopatógenos, el insecto benéfico *Orius insidiosus* y extractos botánicos como el de neem (*Azadirachta indica*) (Figura 6). Uno de los componentes más destacados del extracto de neem es la azadiractina, reconocida como un ingrediente activo clave por su acción insecticida. Este compuesto actúa como antialimentario, repelente y agente disuasivo, además de inducir esterilidad en los insectos al inhibir la oviposición y alterar la producción de esperma en los machos (Chaudhary et al., 2017). La azadiractina es biodegradable, lo que favorece su uso en agricultura sostenible, y presenta una toxicidad muy baja para los mamíferos (Fernandes

et al., 2019). Sin embargo, su aplicación está regulada por los LMR establecidos por la Unión Europea, que para este compuesto es de 0,01 mg/kg (Tabla 3), lo cual exige la aplicación de protocolos estrictos conforme a la ficha técnica del producto. Es importante resaltar que aún se requieren estudios que evalúen si el uso repetido del extracto de neem puede generar acumulación de azadiractina en los frutos de pasifloras, lo que podría poner en riesgo su aceptación en los mercados internacionales.

Las moscas de la fruta representan otra amenaza significativa en pasifloras. Se destacan los géneros *Dasiops* y *Drosophila*, los cuales ocasionan pérdidas por daño directo al fruto (Santamaría et al., 2016; Montalvo Salcedo, 2020). Entre las medidas culturales más recomendadas se encuentra la recolección y destrucción de frutos infestados, con el fin de interrumpir el ciclo de vida de las plagas. No obstante, esta medida aislada no es suficiente, y se sigue recurriendo al uso de insecticidas como spinosad, cyromazine, imidacloprid, lambdacialotrina y thiamethoxam. Según los reportes realizados en España y Francia para el año 2024, estos tres últimos componentes presentaron residualidad en pasifloras colombianas (European Comission, 2024), lo que resalta la urgencia de adoptar alternativas biorracionales.

Como respuesta a esta situación, han surgido alternativas biorracionales. En granadilla (*Passiflora ligularis*), se ha demostrado que extractos de *Chenopodium ambrosioides* (paico) y *Ruta graveolens* (ruda) alcanzan eficacias de control contra *Dasiops* spp. de hasta 59,85 % y 58,39 %, respectivamente (Valverde-Rodriguez y Campos-Albornoz 2021). Asimismo, diversos parasitoides nativos han sido identificados en diferentes especies de *Passiflora*: *Aganaspis pelleranoi* (14,19 %-50,00 %) en botones florales de maracuyá y frutos de granadilla; *Microcrasis* sp. (0,83 %–3,13 %), *Trichopria* sp. (4,00 %–40,00 %) y *Pentapria* sp. (1,67 %–33,33 %) parasitorides de *Dasiops gracilis*, *D. inedulis* y *D. caustonae* (Santamaría et al., 2016). Particularmente, *Pentapria* sp. ha mostrado una distribución geográfica amplia y sugiere un elevado potencial para ser utilizada en programas de control biológico, incluso bajo condiciones de presión química (Santamaría et al., 2016).

Adicionalmente, otras plagas consideradas secundarias, como los ácaros (Tetranychus urticae y T. *mexicanus*), el gusano cosechero (*Agraulis vanillae*) y las cochinillas y escamas (*Pinnaspis strachani* y *Coccus viridis*), también pueden afectar la fisiología de la planta. Estas últimas, al alimentarse por succión de savia, debilitan los tejidos y generan la excreción de mielecilla, la cual promueve el desarrollo de fumagina, afectando la fotosíntesis y la apariencia del fruto. Aunque no suelen alcanzar umbrales económicos de daño de forma recurrente, su presencia puede agravar el estado sanitario del cultivo, especialmente en condiciones de manejo deficiente.

El cumplimiento de los LMR establecidos por la Unión Europea exige no solo prácticas agrícolas adecuadas, sino también sistemas analíticos capaces de detectar residuos con alta precisión. Estudios recientes realizados en Colombia han confirmado que en la

gulupa se encuentran residuos de plaguicidas que requieren una verificación rigurosa antes de su comercialización internacional. Ardila-Díaz et al. (2025) aportaron evidencia clave al validar un método multirresiduo para 74 pesticidas y demostrar que el efecto matriz tiene impacto relevante en la cuantificación, lo que obliga a adaptar las metodologías a cada tipo de fruta tropical para evitar falsos positivos o negativos. Estos hallazgos, junto con los reportes europeos sobre incumplimientos previos, resaltan la necesidad de consolidar capacidades analíticas y sistemas de vigilancia robustos que garanticen la inocuidad y sostenibilidad del comercio internacional de pasifloras.

En este sentido, el éxito en la implementación de estrategias fitosanitarias en cultivos de pasifloras no solo depende de la disponibilidad de insumos autorizados o del conocimiento técnico, sino de la articulación efectiva entre prevención, monitoreo, uso racional de agroquímicos y adopción de tecnologías limpias, como los bioinsumos. Esta integración resulta clave para cumplir con los LMR establecidos por la Unión Europea, y de esta manera proteger la seguridad del alimento y mantener la viabilidad de los mercados de exportación. Además, estas acciones contribuyen a consolidar un modelo de agricultura más resiliente, sostenible y alineado con los principios de responsabilidad social empresarial. En consecuencia, permiten que los consumidores e importadores europeos vuelvan a concebir a las pasifloras colombianas como productos confiables, seguros y competitivos dentro del comercio internacional.

4 CONCLUSIONES

La producción y comercialización de pasifloras en Colombia se encuentra en punto estratégico que combina un gran potencial agroexportador con la demanda creciente de Europa. Las regulaciones de la Unión Europea, especialmente en lo que se refiere a las normativas sobre seguridad alimentaria, sostenibilidad y responsabilidad social empresarial, han transformado profundamente las prácticas agrícolas y los sistemas de control fitosanitario en el país, forzando a los productores y exportadores a hacerse más técnicos, responsables y ambientalmente sostenibles.

El cumplimiento de los LMR, la implementación de Buenas Prácticas Agrícolas y la obtención de certificaciones internacionales como GlobalGAP, Fairtrade, Rainforest Alliance, entre otras, se han consolidado como factores clave para acceder y mantenerse en mercados de alto valor. No obstante, estas exigencias representan desafíos estructurales, especialmente para pequeños productores, debido a los costos y requerimientos técnicos asociados. En este sentido, la asociatividad, el fortalecimiento gremial y los modelos de agricultura por contrato emergen como estrategias clave para democratizar el acceso a dichos mercados.

Desde el punto de vista fitosanitario, la información recopilada evidencia la necesi-

dad de fortalecer los programas de manejo integrado de plagas y enfermedades, incorporando la rotación racional de ingredientes activos, el monitoreo constante, la bioseguridad y el uso complementario de bioinsumos. La vigilancia sobre la residualidad de sustancias químicas se vuelve esencial para evitar rechazos de la fruta, por ello se resalta el potencial del uso de agentes de control biológico y extractos vegetales como alternativa a los agroquímicos convencionales, lo que se alinea con las tendencias regulatorias y del consumidor europeo.

Adicionalmente, el aprovechamiento integral de las pasifloras, incluyendo sus cáscaras y semillas, y su transformación en productos funcionales, posiciona a este cultivo no solo como una fruta exótica de exportación, sino como una fuente estratégica de compuestos bioactivos con aplicaciones en la industria alimentaria, farmacéutica y cosmética.

En conclusión, el éxito y sostenibilidad del sector de pasifloras en Colombia dependerán de su capacidad para adaptarse a las dinámicas regulatorias internacionales, optimizar sus procesos productivos, fortalecer los mecanismos de trazabilidad y asociatividad, y diversificar sus productos con valor agregado. Solo así será posible consolidar una posición competitiva en los mercados globales, garantizando al mismo tiempo la sostenibilidad económica, social y ambiental del sistema productivo. Este estudio constituye un aporte a la comprensión del impacto regulatorio en el sector de las pasifloras colombianas y sirve como insumo para futuas investigaciones comparativas con otros cultivos

CONTRIBUCIÓN DE LA AUTORÍA

Autor 1: revisión bibliográfica, análisis de datos, conceptualización, redacción, revisión y edición.

Autor 2: adquisición de recursos, administrador del proyecto, supervisión, redacción, revisión y edición.

Autor 3: revisión literaria, análisis de datos y edición.

Autor 4: revisión literaria y análisis de datos.

AGRADECIMIENTOS

A los efectos de esta investigación, se agradece el patrocinio institucional otorgado por la Universidad de Cundinamarca y la Facultad de Ciencias Agropecuarias. El apoyo recibido en el desarrollo del proyecto de investigación "Generación de un producto lácteo fermentado de la cadena productiva de la gulupa (*Passiflora edulis f. edulis* Sims)", financiado por la V Convocatoria Interna de Investigación, código N.º 194.

FINANCIAMIENTO

Este trabajo fue financiado por la Universidad de Cundinamarca, a través de la Dirección de Investigación y la Facultad de Ciencias Agropecuarias, mediante la V Convocatoria Interna de Investigación, en el marco del proyecto código 194, titulado "Generación de un producto lácteo fermentado de la cadena productiva de la gulupa *(Passiflora edulis* f. *edulis* Sims)".

USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Se utilizó inteligencia artificial generativa exclusivamente para la elaboración de la imagen resumen (*graphical abstract*) presentada al inicio del manuscrito, a partir de instrucciones y contenidos definidos por los autores. La herramienta fue empleada únicamente con fines de representación gráfica, mientras que la conceptualización, selección de la información científica, interpretación de la literatura, redacción y revisión crítica del manuscrito fueron realizadas íntegramente por los autores. La imagen fue posteriormente revisada y ajustada por los autores para garantizar su concordancia con el contenido científico del artículo.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

LITERATURA CITADA

Altendorf, S. (2018). Minor tropical fruits: Mainstreaming a niche market. Food and Agriculture Organization of the United Nations. https://www.fao.org/fileadmin/templates/est/COMM_MARKETS_MONITORING/Tropical_Fruits/Documents/Minor_Tropical_Fruits_FoodOutlook_1_2018.pdf

Araújo, A. S., Lima, G. S. de, Nunes, I. dos S., Aguiar, J. C. R. de O. F. de, Navarro, D. M. do A. F., Melo, N. F. C. B., Magalhães, N. S. S., França, R., Carvalho, R. de S. F., & Stamford, T. C. M. (2024). Chitosan hydrochloride-gum Arabic-passion fruit seed oil nanoparticle edible coating to control fungal infection and maintain quality parameters of strawberries. *Food Control*, *161*, 110360. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2024.110360

Ardila-Díaz, B. A., Ávila, B. S., Castañeda, M., Gaviria, V. S., & Peñuela, G. A. (2025). Evaluation of the matrix effect in the

analysis of 74 pesticides present in golden gooseberry, purple passion fruit and Hass avocado by UPLC-MS/MS. *Food and Humanity*, *5*, 100782. https://doi.org/10.1016/j.foohum.2025.100782

Ataide, L. M. S., Vargas, G., Velazquez-Hernandez, Y., Reyes-Arauz, I., Villamarin, P., Canon, M. A., Yang, X., Riley, S. S., & Revynthi, A. M. (2024). Efficacy of Conventional and Biorational Insecticides against the Invasive Pest Thrips parvispinus (Thysanoptera: Thripidae) under Containment Conditions. *Insects*, *15*(1), 48. https://doi.org/10.3390/insects15010048

Benítez, S., De León, W., Farfán-Cáceres, L. M., Castillo, S. Y. y Hoyos-Carvajal, L. (2011). Proceso infectivo de la mancha de aceite causada por Xanthomonas axonopodis en gulupa (*Passiflora edulis Sims*). *Revista Fitopatología Colombiana*, *35*(2), 57-62.

Bernacci, L. C., Soares-Scott, M. D., Junqueira, N. T. V., Passos, I. R. D. S., & Meletti, L. M. M. (2008). Passiflora edulis Sims: The correct taxonomic way to cite the yellow passion fruit (and of others colors). *Revista Brasileira de Fruticultura, 30*(2). https://doi.org/10.1590/S0100-29452008000200053

Camargo Piñeres, Y., Zambrano Montenegro, G., Ortega Cuadros, M., Gutierrez Montero, D. J. y Yepes Escorcia, J. A. (2021). Actividad antifúngica in vitro del aceite esencial de Swinglea glutinosa Merr sobre Colletotrichum sp. patógeno de mango (Mangifera indica L.). *Revista Colombiana de Biotecnología*, *23*(1). https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v23n1.88025

Cao, Y., Yang, H., Li, J., Wang, C., Li, C., & Gao, Y. (2019). Sublethal effects of imidacloprid on the population development of western flower thrips Frankliniella occidentalis (Thysanoptera: Thripidae). *Insects*, *10*(1), 3. https://doi.org/10.3390/insects10010003

Carrasco Cabrera, L., Di Piazza, G., Dujardin, B., Marchese, E., & Medina Pastor, P. (2024). The 2022 European Union report on pesicide residues in food. *EFSA Journal*, *22*(4), e8753. https://doi.org/10.2903/j.efsa.2024.8753

Chaudhary, S., Kanwar, R. K., Sehgal, A., Cahill, D. M., Barrow, C. J., Sehgal, R., & Kanwar, J. R. (2017). Progress on *Azadirachta indica* based biopesticides in replacing synthetic toxic pesticides. *Frontiers in Plant Science, 8,* 610. https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00610

Chen, Y. H., Lee, P. C., & Huang, T. P. (2021). Biological control of collar rot on passion fruits via induction of apoptosis in the collar rot pathogen by *Bacillus subtilis*. *Phytopathology*, *111*(4). https://doi.org/10.1094/PHYTO-02-20-0044-R

Da Costa, C. A. R., Machado, G. G. L., Rodrigues, L. J., de Barros, H. E. A., Natarelli, C. V. L., & Boas, E. V. de B. V. (2023). Phenolic compounds profile and antioxidant activity of purple passion fruit's pulp, peel and seed at different maturation stages. *Scientia Horticulturae*, *321*. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112244

Dalio, R. J. D., Maximo, H. J., Roma-Almeida, R., Barretta, J. N., José, E. M., Vitti, A. J., Blachinsky, D., Reuveni, M., & Pascholati, S. F. (2020). Tea tree oil induces systemic resistance against fusarium wilt in banana and xanthomonas infection in tomato plants. *Plants*, *9*(9), 1137. https://doi.org/10.3390/plants9091137

Delgado-Méndez, C. G., Castaño-Zapata, J. y Villegas-Estrada, B. (2013). Caracterización del agente causante de la Roña del Maracuyá (*Passiflora edulis f. flavicarpa Degener*) en Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, *37*(143). https://doi.org/10.18257/raccefyn.5

European Union. (2020). *Farm to Fork Strategy. For a fair, healthy and environmentally-friendly food system*. European comission. https://food.ec.europa.eu/document/download/472acca8-7f7b-4171-98b0-ed76720d68d3_en?filename=f2f_action-plan_2020_strategy-info_en.pdf

European Comission. (2024). *JANUARY 2024 REPORT ON EU AGRI-FOOD FRAUD SUSPICIONS*. https://food.ec.europa.eu/document/download/70e6460b-0a7c-4200-9757-77839407d903_en?filename=ff_ffn_monthly-report_202401.pdf

Fairtrade. (2024). *Fairtrade Standard for Smallscale Producer Organizations: 03.04.2019_v2.2*. Fairtrade International. http://www.fairtrade.net/standards.html

Faleiro, F. G., Junqueira, N. T. V., Junghans, T. G., de Jesus, O. N., Miranda, D., & Otoni, W. C. (2019). Advances in passion fruit (*Passiflora* spp.) propagation. *Revista Brasileira de Fruticultura*, *41*(2). https://doi.org/10.1590/0100-29452019155

FAO. (2004). *Las buenas prácticas agrícolas*. https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/b9ddfc07-d31b-40d7-8a6c-b18c83d399e0/content

Farid, R., Rezaieyazdi, Z., Mirfeizi, Z., Hatef, M. R., Mirheidari, M., Mansouri, H., Esmaelli, H., Bentley, G., Lu, Y., Foo, Y., & Watson, R. R. (2010). Oral intake of purple passion fruit peel extract reduces pain and stiffness and improves physical function in adult patients with knee osteoarthritis. *Nutrition Research*, *30*(9), 601-606. https://doi.org/10.1016/j.nutres.2010.08.010

Fernandes, S. R., Barreiros, L., Oliveira, R. F., Cruz, A., Prudêncio, C., Oliveira, A. I., Pinho, C., Santos, N., & Morgado, J. (2019). Chemistry, bioactivities, extraction and analysis of azadirachtin: State-of-the-art. *Fitoterapia, 134*, 141-150. https://doi.org/10.1016/j.fitote.2019.02.006

Fiankor, D. D. D., Flachsbarth, I., Masood, A., & Brümmer, B. (2020). Does GlobalGAP certification promote agrifood exports? *European Review of Agricultural Economics*, *47*(1), 247-272. https://doi.org/10.1093/erae/jbz023

Fonseca, A. M. A., Geraldi, M. V., Junior, M. R. M., Silvestre, A. J. D., & Rocha, S. M. (2022). Purple passion fruit (*Passiflora edulis f. edulis*): A comprehensive review on the nutritional value, phytochemical profile and associated health effects. *Food Research International,*

160, 111665. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111665

Gil, J. G. R., Tamayo, P. J., & Morales, J. G. (2017). Identification and pathogenicity of microorganisms affecting purple passion fruit in Colombia. *Revista Ceres*, *64*(3), 256-257. https://doi.org/10.1590/0034-737X201764030005

GLOBALG.A.P. (2022). GLOBALG.A.P. *Risk Assessment on Social Practice (GRASP): Principles and criteria (Version 2.0)*. https://documents.globalgap.org/documents/220929_GRASP_PCs_v2_0_Sep22_en.pdf

He, M. H., Wang, Y. P., Jiao Wu, E., Shen, L. L., Yang, L. N., Wang, T., Shang, L. P., Zhu, W., & Zhan, J. (2019). Constraining Evolution of *Alternaria alternata* Resistance to a Demethylation Inhibitor (DMI) Fungicide Difenoconazole. *Frontiers in Microbiology*, *10, 1609*. https://doi.org/10.3389/fmicb.209.01609

Huo, D., Dai, J., Yuan, S., Cheng, X., Pan, Y., Wang, L., & Wang, R. (2023). Eco-friendly simultaneous extraction of pectins and phenolics from passion fruit (*Passiflora edulis Sims*) peel: Process optimization, physicochemical properties, and antioxidant activity. *International Journal of Biological Macromolecules*, *243,* 125229. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.125229

Instituto Colombiano Agropecuario. [ICA]. (2022). *Resolución No. 00000824 (28 de enero de 2022), por la cual se establecen los requisitos para el registro ante el ICA de los lugares de producción, exportadores y empacadoras de vegetales para la exportación en fresco.* https://www.ica.gov.co/importacion-y-exportacion/planes-trabajo-exportacion-vegetales/documentos-relacionados/resolucion_ica_824_2022.aspx

Instituto Colombiano Agropecuario [ICA]. (2025). *Registros de productos de bioinsumos de uso agrícola*.

Kandandapani, S., Balaraman, A. K., & Ahamed, H. N. (2015). Extracts of passion fruit peel and seed of *Passiflora edulis* (*Passifloraceae*) attenuate oxidative stress in diabetic rats. *Chinese Journal of Natural Medicines*, *13*(9), 680-686. https://doi.org/10.1016/S1875-5364(15)30066-2

Khuwijitjaru, P., & Klinchongkon, K. (2020*). Passion fruit. En C. M. Galanakis (Ed.), Valorization of fruit processing by-products (pp. 183-201).* Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817106-6.00009-5

Leones de Souza, V., & Tañski, N. D. (2022). Economic indicators in the cultivation of passion fruit (passiflora edulis) in the central region of Rondônia – Western Amazon. *International Journal for Innovation Education and Research*, *10*(11). https://doi.org/10.31686/ijier.vol10.iss11.3983

Liang, Y., Yang, Y., Zheng, L., Zheng, X., Xiao, D., Wang, S., Ai, B., & Sheng, Z. (2022). Extraction of Pectin from Passion Fruit Peel: Composition, Structural Characterization and Emulsion Stability. *Foods*, *11*(24), 3995. https://doi.org/10.3390/foods11243995

López, Y. G., Cocomá, C. J., & Bacca, T. (2022). The kairomone p-anisaldehyde increases the effectiveness of sticky traps for capturing Neohydatothrips signifer (*Insecta: Thysanoptera*) in yellow passion fruit (*Passiflora edulis*) crops. *Boletin Cientifico del Centro de Museos*, *26*(2). https://doi.org/10.17151/BCCM.2022.26.2.10

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. [Minagricultura]. (2012). *Acuerdo de Competitividad de la Cadena Productiva de Pasifloras en Colombia.* Gobernación del Huila; CEPASS Huila. https://sioc.minagricultura.gov.co/Pasifloras/Normatividad/004%20-%20D.C.%20-%20Acuerdo%20de%20Competitividad%20Cadena%20Pasifloras.pdf

Monje, B., Delgadillo, D., Gómez, J. C. y Varón, E. H. (2012). Manejo de Neohydatothrips signifer Priesner (*Thysanoptera: Thripidae*) en maracuyá (*Passiflora edulis f. flavicarpa Degener*) en el departamento del Huila (Colombia). *Ciencia & Tecnología Agropecuaria*, *13*(1), 236. https://doi.org/10.21930/rcta.vol13_num1_art:236

Montalvo Salcedo, E. F. (2020). *Duración del ciclo de vida de* Drosophila *sp. en* Passiflora edulis f. edulis Sims*, 1818, en función a temperatura y humedad relativa específicas, en laboratorio y campo.* [Proyecto de investigación]. Repositorio institucional UNAD. https://repository.unad.edu.co/handle/10596/36770

Mozzaquatro, J. de O., César, I. A., Pinheiro, A. E. B., & Caldas, E. D. (2022). Pesticide residues analysis in passion fruit and its processed products by LC–MS/MS and GC–MS/MS: Method validation, processing factors and dietary risk assessment. *Food Chemistry*, *375,* 131643. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131643

Newsom, D., & Milder, J. C. (2018). *Rainforest Alliance impacts report 2018: Partnership, learning, and change*. Rainforest Alliance. https://www.rainforest-alliance.org/resource-item/impacts-report-2018-impact-study/

Ocamo, J., Morillo-Coronado, Y., Espinal, F. y Moreno, I. (2022). *Tecnología para el cultivo del maracuyá (*Passiflora edulis f. flavicarpa Degener*) en Colombia*. Universidad Nacional de Colombia y Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria-Agrosavia Palmira.

OpenAI. (2025). *ChatGPT (versión GPT-5.5) [Modelo de lenguaje de gran escala]*. https://chatgpt.com/

Orjuela-Baquero, N. M., Campos Alba, S., Sánchez Nieves, J., Melgarejo, L. M., & Hernández, M. S. (2011). *Manual de manejo poscosecha de la gulupa (Passiflora edulis Sims).* En L. M. Melgarejo & M. S. Hernández (Eds.), *Poscosecha de la gulupa (Passiflora edulis Sims)* (pp. 7–22). Universidad Nacional de Colombia.

Orozco, C. (2022). Sistema europeo de límites máximos de residuos de plaguicidas y su impacto en la oferta exportable colombiana. Estudios en Derecho, *Comercio & Globalización,2, 1-23.* https://derecho.uniandes.edu.co/sites/default/files/edcg02_23nov2022.pdf

Ortiz C., E. y Hoyos C., L. M. (2013). Descripción de la sintomatología asociada a fusariosis y comparación con otras enfermedades en gulupa (*Passiflora edulis Sims*.) en la región del Sumapaz (Colombia). *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, *6*(1), 110-116. https://doi.org/10.17584/rcch.2012v6i1.1277

Paramalingam, P., Baharum, N. A., Abdullah, J. O., Hong, J. K., & Saidi, N. B. (2023). Antifungal Potential of *Melaleuca alternifolia* against Fungal Pathogen *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense Tropical Race 4. *Molecules*, *28*(11), 4456. https://doi.org/10.3390/molecules28114456

Patiño-Pacheco, M. J. y Pérez-Cardona, O. Y. (2021). Evaluación de la resistencia de genotipos de *Passifloras* a *Fusarium solani f.* sp. *passiflorae* en granadilla. *Entramado*, *17*(2), 257-267. https://doi.org/10.18041/1900-3803/entramado.2.682

Pauzuoliene, J., Simanskiene, L., & Pacevičiūtė, A. (2023). Responsible consumption in Europe: causes and habits. *Scientific Papers of Silesian University of Technology. Organization and Management Series*, *2023*(166). https://doi.org/10.29119/1641-3466.2022.166.37

Quinchanegua Pineda, E. L., Pirazán Cuervo, I. G. y Lache, M. F. (2019). *Las buenas prácticas agrícolas*. Universidad Santo Tomás. https://doi.org/10.15332/li.lib.2019.00131

Quiroga-Rojas, L. F., Ruiz-Quiñones, N., Muñoz-Motta, G. y Lozano-Tovar, M. D. (2012). Microorganismos rizosféricos, potenciales antagonistas de Fusarium sp. causante de la pudrición radicular de maracuya (*Passiflora edulis Sims*). *Acta Agronomica*, *61*(3), 265-272.

Renkema, J. M., Krey, K., Devkota, S., Liburd, O. E., & Funderburk, J. (2020). Efficacy of insecticides for season-long control of thrips (Thysanoptera: Thripidae) in winter strawberries in Florida. *Crop Protection*, *127*, 104945. https://doi.org/10.1016/j.cropro.2019.104945

Riascos, D., Quiroga, I., Gómez, R., & Hoyos-Carvajal, L. (2012). *Cladosporium*: Causal agent of scab in purple passion fruit or gulupa (*Passiflora edulis Sims*.). *Agricultural Sciences*, *3*(2), 299-305. https://doi.org/10.4236/as.2012.32034

Rudas, C. E. (2020). Colombia exporta en promedio US$75 millones al año de la fruta exótica Gulupa. *Agronegocios*. https://www.agronegocios.co/agricultura/colombia-exporta-en-promedio-us-75-millones-al-ano-de-la-fruta-exotica-gulupa-2975537

Sandoval-Cáceres, Y. P. y Cruz-Castiblanco, G. N. (2024). Artropofauna de importancia agrícola asociada al cultivo de gulupa (*Passiflora edulis f. edulis*) (Sims, 1818). En *Perspectivas para el manejo sostenible de las frutas de la pasión* (1.ª ed., pp. 33-56). Sello Editorial Universidad de Cundinamarca.

Santamaría, M., Ebratt, E., Castro, A. y Brochero, H. L. (2016). Parasitoides himenópteros de Dasiops (*Diptera: Lonchaeidae*) que infestan *Passiflora* spp. (*Passifloraceae*) cultivadas en Cundinamarca y Bo-

yacá, Colombia. *Agronomía Colombiana*, *34*(2), 200-208. https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v34n2.55616

Sedex. (s.f.). *What is SMETA?* https://www.sedex.com/solutions/smeta-audit/

Sparks, T. C., & Nauen, R. (2015). IRAC: Mode of action classification and insecticide resistance management. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, *121,* 122-128. https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2014.11.014

Suthavivat, P. (2019). Sustainable fresh produce business practice: A case of SWIFT Co. Ltd. *Acta Horticulturae, 1245,* 153-156. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2019.1245.22

Valverde-Rodriguez, A. y Campos-Albornoz, E. (2021). Extractos vegetales en la reducción de las infestaciones de *Dasiops spp.* en el cultivo de granadilla. *Manglar*, *18*(1), 15-20. https://revistas.untumbes.edu.pe/index.php/manglar/es/article/view/215

Vásquez Gallo, L. A. (2020). Buenas prácticas agrícolas (BPA). En J. A. Bernal Estrada & C. A. Diaz Diez (Eds.), *Actualización tecnológica y buenas prácticas agrícolas (BPA) en el cultivo de aguacate* (pp. 379-461). Agrosavia.

Verweij, P. E., Lucas, J. A., Arendrup, M. C., Bowyer, P., Brinkmann, A. J. F., Denning, D. W., Dyer, P. S., Fisher, M. C., Geenen, P. L., Gisi, U., Hermann, D., Hoogendijk, A., Kiers, E., Lagrou, K., Melchers, W. J. G., Rhodes, J., Rietveld, A. G., Schoustra, S. E., Stenzel, K., Zwaan, B. J., & Fraaije, B. A. (2020). The one health problem of azole resistance in *Aspergillus fumigatus*: current insights and future research agenda. *Fungal Biology Reviews, 34*(4), 202-214. https://doi.org/10.1016/j.fbr.2020.10.003

Wang, Y., Teng, Y., Zhang, J., Zhang, Z., Wang, C., Wu, X., & Long, X. (2023). Passion fruit plants alter the soil microbial community with continuous cropping and improve plant disease resistance by recruiting beneficial microorganisms. *PLoS ONE, 18*(2), e0281854. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0281854

Watson, R. R., Zibadi, S., Rafatpanah, H., Jabbari, F., Ghasemi, R., Ghafari, J., Afrasiabi, H., Foo, L. Y., & Faridhosseini, R. (2008). Oral administration of the purple passion fruit peel extract reduces wheeze and cough and improves shortness of breath in adults with asthma. *Nutrition Research*, *28*(3), 166-171. https://doi.org/10.1016/j.nutres.2008.01.003

Wesseler, J. (2022). The EU's farm-to-fork strategy: An assessment from the perspective of agricultural economics. *Applied Economic Perspectives and Policy*, *44*(4), 1826-1843. https://doi.org/10.1002/aepp.13239

Yahia, E. M., García-Solís, P., & Maldonado Celis, M. E. (2018). Contribution of fruits and vegetables to human nutrition and health. In *Postharvest Physiology and Biochemistry of Fruits and Vegetables*, 19-45. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813278-4.00002-6

Ye, X., Wang, C., Ng, T. B., & Zhang, W. (2021). Study on the biocontrol potential of antifungal peptides produced by *Ba-*

cillus velezensis against *Fusarium solani* that infects the passion fruit *Passiflora edulis*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *69*(7), 2051-2061. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c06106

Zuluaga, J. M. (2015). *Factores Determinantes que Afectan la Rentabilidad de las Empresas Exportadoras de Frutas Exóticas Hacia Europa*. http://hdl.handle.net/10654/13751

Conflicto de intereses
Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Licencia de Creative Commons
Revista de Investigación Agraria y Ambiental is licensed under a Creative Commons Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual 4.0 Internacional License.

Fecha de recibido: 30-05-2025
Fecha de aceptado: 08-12-2025
DOI: 10.22490/21456453.9953

MICROORGANISMOS ASOCIADOS A LA RIZOSFERA DE PLANTAS DE CAFÉ: DIVERSIDAD, FUNCIONES Y PERSPECTIVAS PARA LA AGRICULTURA SOSTENIBLE

MICROORGANISMS ASSOCIATED WITH THE RHIZOSPHERE OF COFFEE PLANTS: DIVERSITY, ROLES AND PERSPECTIVES FOR SUSTAINABLE AGRICULTURE

David Alberto Portillo Benavides[1]
Stephany Hurtado-Clopatosky[2]
Diego Andrés Abril Herrera[3]

Citación: Portillo Benavides D., Hurtado-Clopatosky S. y Abril Herrera D. (2026). Microorganismos asociados a la rizosfera de plantas de café: diversidad, funciones y perspectivas para la agricultura sostenible. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental, 17*(2), 77-119. https://doi.org/10.22490/21456453.10040

[1]Magíster en Ciencias biológicas, Universidad de Cundinamarca, Fusagasugá, Colombia. dportillo@ucundinamarca.edu.co

[2]Magíster en Ciencias Agrarias, Universidad de Cundinamarca, Fusagasugá, Colombia. shurtadoc@ucundinamarca.edu.co

[3]Magíster en Ciencias Pecuarias, Universidad de Cundinamarca, Fusagasugá, Colombia. adiego@ucundinamarca.edu.co

RESUMEN

Contextualización: La rizosfera, al ser un área de suelo muy cercana a la raíz, está directamente influenciada por las plantas que crecen en él y por los diferentes compuestos que exudan. El cultivo del café tuvo sus inicios entre los siglos XV y XVI, desde entonces es apreciado alrededor del mundo, y alcanza una producción estimada de 10 millones de toneladas. Esto requiere extensas áreas dedicadas a su producción que generan impactos significativos a nivel ambiental, económico y social.

Vacío de conocimiento: Aunque el café es de importancia agronómica y se cultiva en muchos países del mundo, el microbioma rizosférico ha sido poco explorado y hace falta una visión general de los factores que influyen sobre su composición, además, es importante caracterizar sus posibles funciones y aplicaciones para el manejo del cultivo.

Propósito: Con este trabajo se pretende analizar las dinámicas microbianas en la rizosfera de café y sus implicaciones en el manejo del cultivo, con miras al establecimiento de modelos de producción sostenibles.

Metodología: Se recopiló información del cultivo del café enfocada en los diferentes microorganismos presentes en su rizosfera. Mediante una revisión sistemática de documentos indexados en bases de datos científicas reconocidas, como Scopus, Scielo, Science Direct, SpringerLink y Web of Science, y a partir de los documentos seleccionados según los criterios establecidos, se realizó un análisis narrativo.

Resultados y conclusiones: Se analizaron los factores que influencian la diversidad de la población de microorganismos en la rizosfera del café, así como la especie de café establecida en el sitio, las condiciones geográficas, las características fisicoquímicas del suelo y el tipo de manejo del cultivo. Con estos resultados fue posible inferir que la composición de la población de microorganismos rizosféricos es modulada con un complejo conjunto de factores que regulan la interacción planta- microorganismos.

Palabras clave: microorganismo, nutrientes, bacteria, hongo, efectos de las actividades humanas.

ABSTRACT

Contextualization: The rhizosphere, being an area of soil very close to the root, is directly influenced by the plants growing in it and by the different compounds they exude. The cultivation of coffee began between the 15th and 16th centuries and has since been appreciated around the world, and reaching an estimated production of 10 million tons. This requires extensive areas dedicated to coffee production that generate significant environmental, economic and social impacts.

Knowledge gap: Although coffee cultivation is of agronomic importance and is grown in many countries around the world, the rhizospheric microbiome remains understudied and an overview of the factors that influence its composition is lacking. In addition, it is important to characterize its possible functions and applications for crop management.

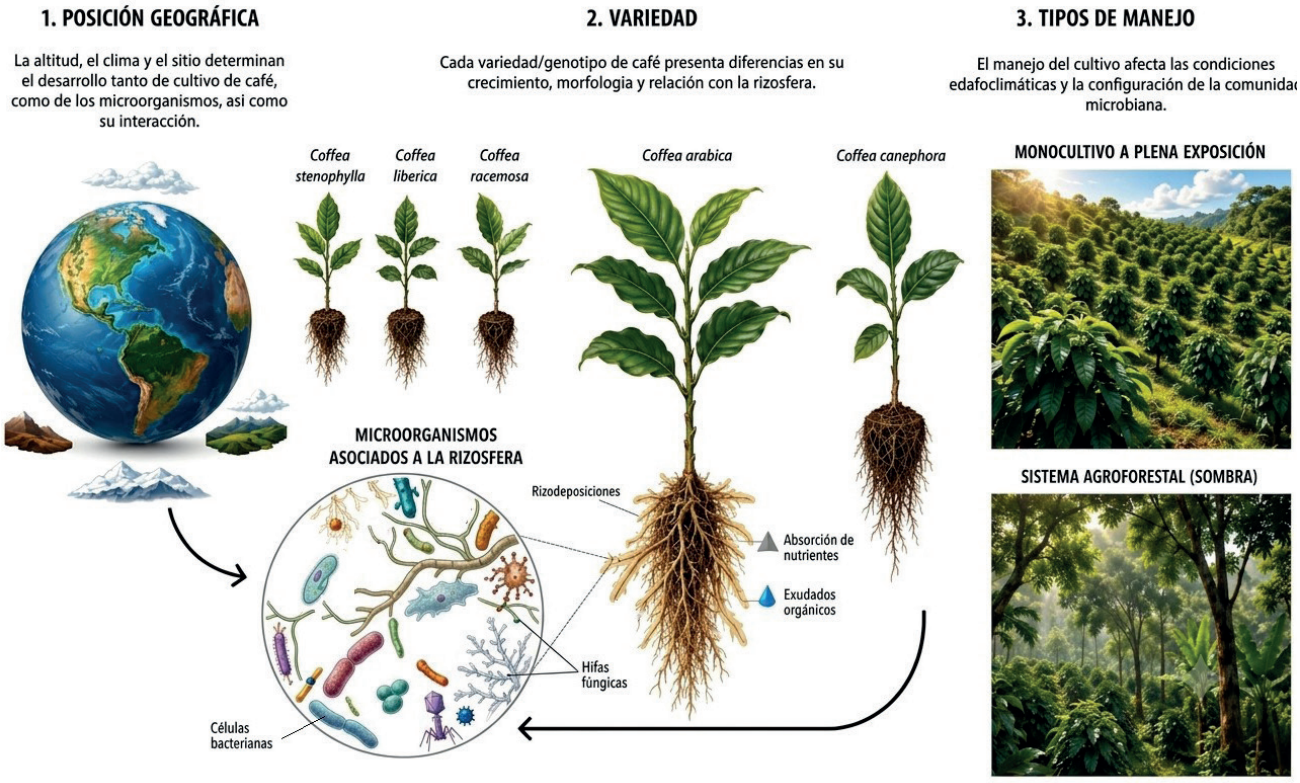
Objective: To analyze the microbial dynamics in the rhizosphere of the coffee plant and its implications for crop management, with a view to establishing sustainable production models.

Methodology: Information was collected on coffee cultivation focusing on the different microorganisms present in its rhizosphere. A narrative analysis was performed through a systematic review of documents indexed in recognized scientific databases such as Scopus, Scielo, ScienceDirect, SpringerLink and Web of Science, and based on the documents selected according to the established criteria.

Results and conclusions: The factors that influence the diversity of the population of microorganisms in the rhizosphere of the coffee plant were analyzed, as well as the coffee species established at the site, the geographical conditions, the physicochemical characteristics of the soil and the type of crop management. Based on these results it was possible to infer that the composition of the rhizospheric microorganism population is modulated by a complex set of factors that regulate the plant-microorganism interactions.

Keywords: Microorganism, nutrients, bacteria, fungus, effects of human activities.

RESUMEN GRÁFICO



Fuente: autores.

1 INTRODUCCIÓN

El café es un cultivo ampliamente distribuido a nivel mundial, existen 103 especies en el género *Coffea* (Davis et al., 2006), en Colombia se destacan las variedades de *Coffea arabica*, *Coffea canephora y Coffea liberica* (Davis et al., 2006). Los productos obtenidos a partir de este cultivo tienen componentes como la cafeína, ácido cafeico, ácidos clorogénicos, cafestol, ácido ferúlico y kahweol, que exhiben propiedades antioxidantes, antinflamatorias y anticancerígenas (Islam et al., 2018). Además, su uso se ha ampliado a diversas aplicaciones en las industrias alimentaria, cosmética y farmacéutica (Patay et al., 2016). La economía relacionada con este sector se ha enfrentado a retos como la vulnerabilidad económica de los agricultores y las preocupaciones medioambientales, lo que ha provocado un aumento de la demanda de café sostenible (Silva et al., 2019). La sostenibilidad del café se ha convertido en un tema de investigación cada vez más importante, sobre todo en los principales países productores, como Brasil, Vietnam, Uganda y Colombia (Campos Trigoso et al., 2021). El enfoque sostenible

relacionado con el uso de microorganismos en el cultivo ha tenido gran auge en los últimos años, puesto que se ha demostrado que estos pueden mejorar la productividad sin afectar el medio ambiente (Singh et al., 2020). Por lo tanto, comprender la ecología de la rizosfera y las interacciones entre plantas y microorganismos es crucial para desarrollar prácticas agrícolas sostenibles y técnicas de restauración ecológica (Haldar & Sengupta, 2015).

El factor que puede tener una mayor influencia en la relación de los microorganismos y la plantas es la rizosfera. Esta es una región del suelo influenciada por las raíces, caracterizada por complejas interacciones bioquímicas entre plantas, suelo y microorganismos (Broeckling et al., 2019). Este es un espacio dinámico en el cual pueden influir diversos factores, como las especies vegetales, la arquitectura de las raíces, las propiedades del suelo y la diversidad microbiana (Broeckling et al., 2019). Las plantas modifican su rizosfera a través de la absorción de nutrientes, la exudación radicular y la rizodeposición, afectando las características químicas, físicas y biológicas del suelo (El- Shatnawi & Makhadmeh, 2001). Estos cambios influyen en la composición y diversidad de la comunidad microbiana, que a su vez afecta al crecimiento, desarrollo y disponibilidad de nutrientes (Haldar & Sengupta, 2015). Adicionalmente, el microbioma de la rizosfera puede afectar al equilibrio hormonal de las plantas, la actividad enzimática y la competencia con otras plantas (El- Shatnawi & Makhadmeh, 2001). Así mismo, se ha encontrado que el microbioma de la rizosfera puede contribuir a la sanidad de las plantas al combatir a los patógenos o mejorar la respuesta de defensa de estas (Li et al., 2021). Actualmente, se ha empezado a desarrollar una mayor cantidad de investigaciones en esta área; hasta el momento, se está empezando a generar un mayor interés en cultivos como el café, por tanto, hay poco conocimiento del microbioma en estas plantas. Este artículo tiene como objetivo hacer una revisión con los principales grupos de hongos y bacterias reportados en cultivos de café, además, del impacto que pueden llegar a tener el tipo de manejo en la diversidad y las perspectivas a futuro para impulsar el desarrollo de una agricultura productiva y sostenible en los cultivos de café.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

Se recogió información actualizada sobre el cultivo del café que describe los principales microorganismos asociados a su rizosfera, su papel en la agricultura y el medio ambiente. Por medio de una revisión sistemática de documentos científicos presentes en bases de datos reconocidas, como Scopus (54 registros), Scielo (4 registros), Science Direct (355 registros), Springer Nature Link (263 registros) y Web of Science (62 registros), utilizando como términos de búsqueda “Rhizosphere” AND “coffea”. Se consultaron textos en inglés y en español, estableciendo como criterios de selección: publicaciones

entre 2015 y 2025, acceso a texto completo y estudios sometidos a revisión por pares (Figura 1). A partir de los artículos seleccionados, se identificaron las regiones donde se han reportado investigaciones sobre esta temática, así como los géneros de hongos y bacterias con mayor abundancia. Con los datos recolectados se elaboraron matrices, que posteriormente fueron procesadas en la plataforma RStudio para la construcción de las figuras. Para la figura 2, se incluyeron 41 artículos (datos suplementarios 1) y se utilizó la librería ggplot para construir el mapa. Los mapas de calor se generaron a partir de los 20 géneros bacterianos y 20 fúngicos más abundantes registrados en los artículos, utilizando las librerías heatmap. Finalmente, con base en esta información, se discutieron las principales funciones y aplicaciones reportadas para los géneros de bacterias y hongos predominantes, así como su posible uso en el manejo del cultivo.

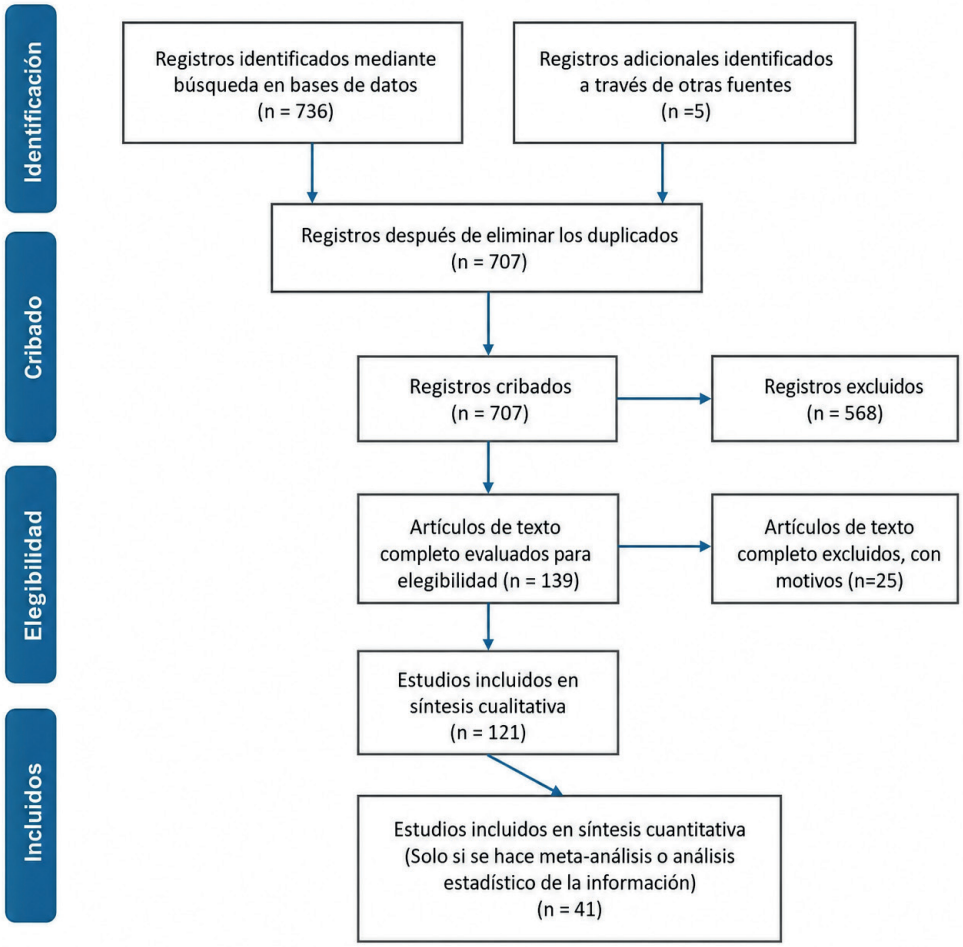


Figura 1. Diagrama de flujo Prisma 2009 para revisiones sistemáticas

Fuente: adaptado de Moher et al., 2009.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Regiones con investigaciones de la microbiota en el cultivo de café a nivel mundial

El café es uno de los cultivos de mayor impacto en la economía mundial. Esto ha llevado a que diversos países se especialicen en su producción, lo que a su vez ha impulsado un incremento significativo en las investigaciones relacionadas con este cultivo (Figura 2). Brasil se destaca como uno de los principales productores de café en el mundo, situación que se refleja en la abundancia de estudios científicos sobre este cultivo. De los artículos de investigación consultados, la mayoría provenían de este país, donde las investigaciones no solo abordan la composición de la comunidad microbiana, sino también el impacto de diferentes prácticas de cultivo en la diversidad y estructura microbiana (de Sousa et al., 2022; Araújo et al., 2020; de Sousa et al., 2023; Veloso et al., 2023; Andrade et al., 2023; Bresciani et al., 2024; Moreira et al., 2018; Bullergahn et al., 2024; Al-Areqi et al., 2013; Kutos et al., 2024). Países como China (Zhao et al., 2018; Ge et al., 2023; Wang et al., 2023; Zhao et al., 2023; Sun et al., 2024; Wu et al., 2025), Colombia (Bez et al., 2023; Solis et al., 2023; Kutos et al., 2024; Ochoa-Henriquez et al., 2024), Indonesia (Kartika et al., 2019; Yusuf et al., 2021; Suharjono & Yuliatin, 2022; Hindersah et al., 2023; Farha et al., 2024), Etiopía (Muleta et al., 2021; Teshome et al., 2017; Bez et al., 2023), y México (Carrasco-Espinosa et al., 2022; Jasso-Arreola et al., 2025; Morales-Ruiz et al., 2025) reportan entre tres y seis investigaciones. Entre los países que reportan al menos un estudio se encuentran Vietnam (Duong et al., 2021; Tran et al., 2022), Burundi (Bez et al., 2023, Italia (Bez et al., 2023, Yemen (Al-Areqi et al., 2013, El Salvador (Rao et al., 2020; Kutos et al., 2024), Nicaragua (Jurburg et al., 2020), Filipinas (Navarro et al., 2023), Perú (Kutos et al., 2024), India (Kejela et al., 2016) y Mozambique (Tapaca et al., 2024).

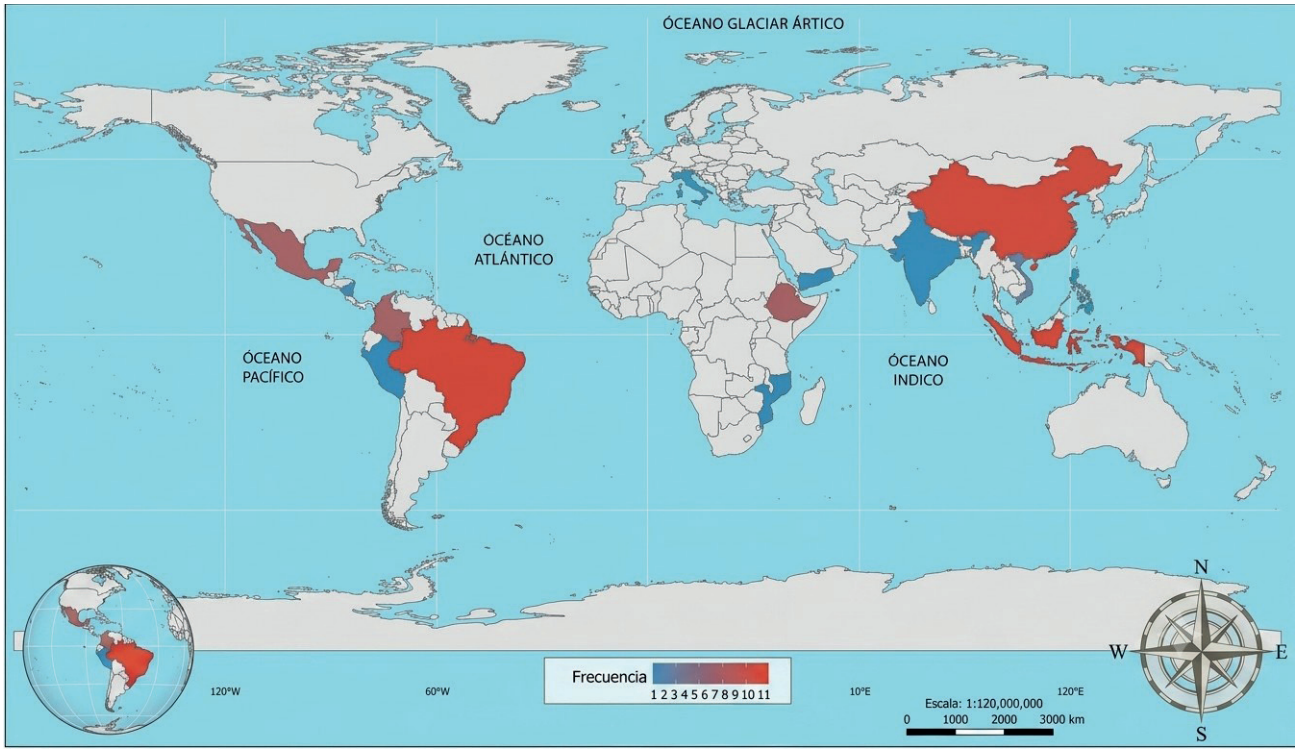


Figura 2. *HeatMaps* de la distribución de investigaciones realizadas en diferentes países a nivel mundial

Fuente: autores.

Microorganismos reportados para cultivos de café

El suelo se caracteriza por presentar una gran abundancia y diversidad de bacterias. Estas pueden analizarse mediante el aislamiento en medios de cultivo específicos o a través de estudios metataxonómicos y/o metagenómicos (Jan-Roblero et al., 2024; Shayanthan et al., 2022). Para la caracterización taxonómica de bacterias aisladas, se utiliza comúnmente el gen 16S rRNA, debido a su alta precisión para identificar organismos hasta el nivel de especie. En el caso de los hongos, el marcador más empleado es la región hipervariable ITS (Internal Transcribed Spacer); sin embargo, cuando se requiere una clasificación más detallada, la región TEF1-α resulta más adecuada (Renzi et al., 2023; Oliveira et al., 2024).

En los análisis metataxonómicos, el gen más utilizado es también el 16S rRNA o algunas de sus regiones, como V3–V4. La información obtenida permite evaluar la estructura de la comunidad microbiana, así como los cambios en la diversidad alfa y beta (Jiang et al., 2021; Oliveira et al., 2022). Por su parte, los estudios metagenómicos han sido menos desarrollados, debido a su mayor costo. En este enfoque se secuencia todo el material genómico presente, lo que permite lograr una mayor resolución filogenética al utilizar múltiples marcadores moleculares y, adicionalmente, acceder a genes funcionales

con los cuales es posible reconstruir rutas metabólicas (Bekele et al., 2025). En la revisión realizada para este estudio, se encontró que el 66 % de los artículos (27 estudios) emplean la metataxonómica, mientras que el 34 % (14 estudios) analizan la microbiota a partir de aislamientos en laboratorio. Es importante destacar que ambas aproximaciones poseen enfoques distintos dentro de la ecología microbiana y ofrecen alcances biotecnológicos complementarios; por lo tanto, no existe una técnica "mejor" que otra, sino que su pertinencia depende de la pregunta de investigación.

Uno de los aspectos clave para estudiar la diversidad de la microbiota asociada a los cultivos de café es la especie vegetal evaluada. A nivel mundial, las especies de mayor relevancia comercial son *Coffea arabica* y *Coffea canephora* (Razafinarivo et al., 2013; Sattler et al., 2022). *C. arabica* concentra la mayoría de las investigaciones con un 53 %, seguida de *C. canephora* con un 24 %. Solo unos pocos estudios han analizado el impacto de la comunidad microbiana en otras especies (Andrade et al., 2023; Bez et al., 2023; de Sousa et al., 2023; Veloso et al., 2023). Otras especies en las que se han realizado investigaciones encaminadas a comprender la estructura de la comunidad bacteriana y fúngica incluyen *Coffea stenophylla*, *Coffea racemosa* y *C. liberica* (de Sousa et al., 2022; Navarro et al., 2023). Algunos trabajos han comparado cómo cambia la biodiversidad microbiana de la rizosfera según la especie, considerando que esta puede variar en función de las características propias de la planta y de las condiciones ambientales del sitio de crecimiento (Brtnicky et al., 2021; Ling et al., 2022; Pantigoso et al., 2022).

La figura 3 muestra la variabilidad de los géneros bacterianos asociados a la rizosfera del café reportados en distintos países productores. Se observa que géneros como *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Mycobacterium* y *Sphingomonas* presentan una alta frecuencia en múltiples regiones, lo que sugiere que podrían constituir parte del núcleo microbiano rizosférico del café a escala global, dado su papel en procesos como la solubilización de nutrientes, la promoción del crecimiento vegetal y la supresión de patógenos (Walsh et al., 2019; Chopra et al., 2020; Asaf et al., 2020; Sutariati et al., 2020). En contraste, géneros como *Reyranella*, *Chujaibacter*, *Granulicella* o *Haliangium* aparecen de manera más localizada, lo que indica una fuerte influencia de factores edafoclimáticos, prácticas de manejo y condiciones agroecológicas en la composición microbiana (Kalam et al., 2020; Behnke et al., 2021; Villamil et al., 2021). En conjunto, estos patrones reflejan la complejidad y diversidad de la comunidad bacteriana rizosférica del café y subrayan la importancia de comprender estas interacciones para mejorar la salud del cultivo, la eficiencia nutricional y la sostenibilidad de los sistemas productivos.

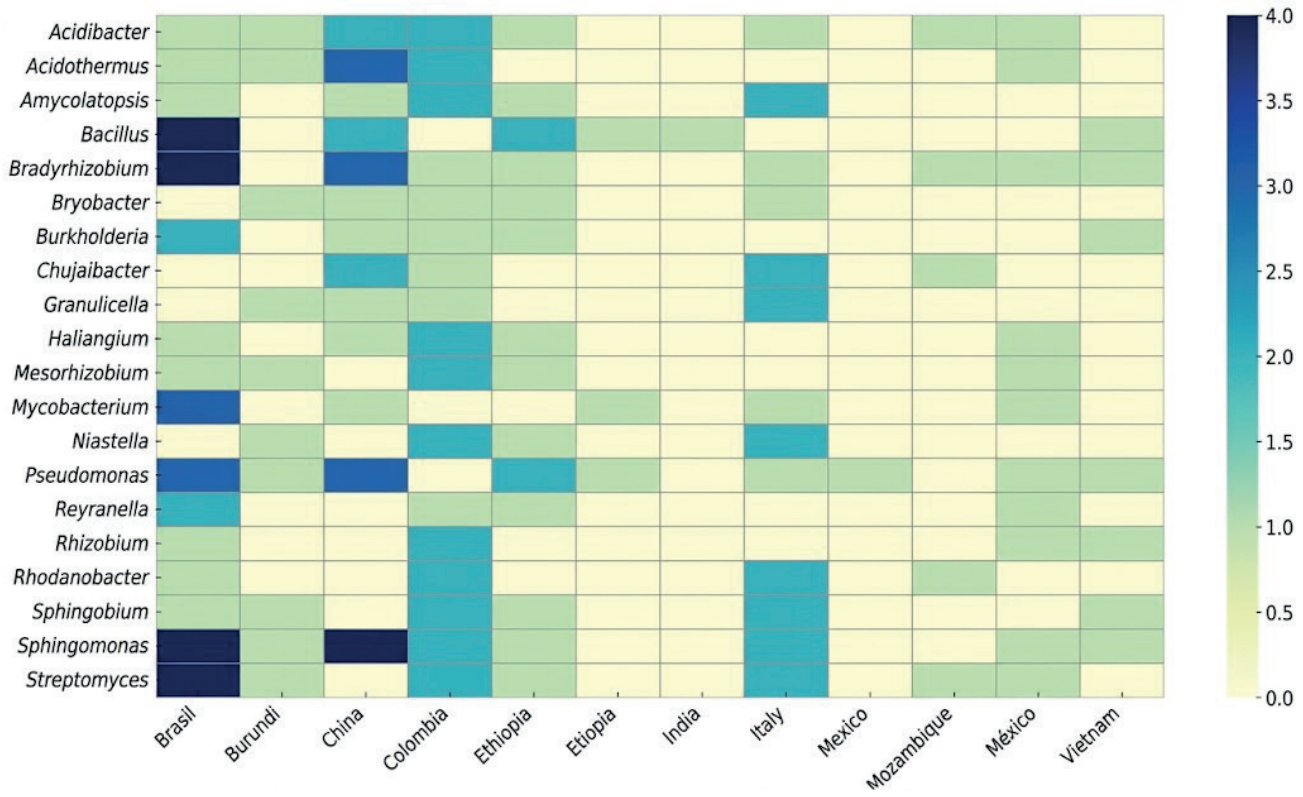


Figura 3. Diagrama de calor (*heatmap*) que muestra la frecuencia de reportes en la literatura consultada sobre géneros bacterianos detectados en distintos países productores de café

Fuente: autores.

Bacterias comunes en la rizosfera del café: diversidad funcional y ecológica

La rizosfera del café constituye un entorno microbiano altamente dinámico, donde interactúan comunidades bacterianas que contribuyen significativamente al reciclaje de nutrientes, la promoción del crecimiento vegetal y la protección frente a patógenos. En esta sección se presentan las características funcionales de los géneros bacterianos más comúnmente reportados en estudios sobre suelos rizosféricos asociados a este cultivo, enfatizando su diversidad metabólica y ecológica.

Bacterias involucradas en la movilización y transformación de nutrientes

Diversos géneros bacterianos presentes en la rizosfera del café participan activamente en la transformación y disponibilidad de nutrientes esenciales. *Acidothermus* se caracteriza por la producción de ácidos orgánicos, los cuales influyen directamente en la solubilización de minerales del suelo (Drever & Stillings, 1997; Richter et al., 2007). En un sentido similar, *Chujaibacter* ha sido reportado con alta capacidad para remover fósforo y nitrógeno en los sistemas donde habita; es un bacilo aerobio típico de suelos

cafetaleros, donde también se asocia a bajos valores de pH y altos contenidos de materia orgánica disuelta (Xin et al., 2021; Zhang et al., 2023b; Behnke et al., 2021; Villamil et al., 2021).

Por su parte, *Dyella* es un género de bacterias gramnegativas, aeróbicas y copiótrofas es decir, que proliferan en condiciones de alta disponibilidad de nutrientes, con un notable potencial celulolítico. Su actividad está estrechamente vinculada con la transformación de carbono y la formación de carbono orgánico disuelto, lo cual impacta la dinámica del carbono en los suelos rizosféricos (Guo et al., 2016; Weon et al., 2009; Su et al., 2020). De manera complementaria, *Edaphobaculum*, una bacteria gramnegativa estrictamente aerobia, ha sido reportada tanto en suelos de pasturas como de café. Este género es altamente sensible a los cambios ambientales, por lo que su reducción puede ser un indicador de fatiga en suelos agrícolas. Además, se ha descrito la presencia de genes funcionales asociados a ciclos biogeoquímicos (Cao et al., 2017; Kruczyńska et al., 2023; Zhao et al., 2022).

Dentro del filo Acidobacteria, el género *Granulicella* destaca por su metabolismo quimiorganótrofo y su capacidad de producir exopolisacáridos, lo que le permite adherirse a partículas del suelo y generar microambientes favorables para el crecimiento vegetal. Asimismo, produce ácido indolacético y sideróforos, compuestos asociados a la promoción del crecimiento de las plantas (Kalam et al., 2020; Oshkin et al., 2019; Costa et al., 2020).

Géneros asociados a la fijación y transformación del nitrógeno

El ciclo del nitrógeno en la rizosfera del café involucra una amplia gama de bacterias con diferentes estrategias metabólicas. Entre ellas, *Bradyrhizobium y Mesorhizobium* son ampliamente reconocidos por su capacidad de formar asociaciones simbióticas con leguminosas y fijar nitrógeno atmosférico (Jones et al., 2016; Sugawara et al., 2011; Vaninsberghe et al., 2015; Colombi et al., 2023; Zhang et al., 2023a). Además, *Mesorhizobium* presenta funciones complementarias, como la producción de ácido indolacético, sideróforos y la solubilización de potasio (Knežević et al., 2022; Menéndez et al., 2020; Muleta et al., 2021). *Rhizobium*, otro género simbionte, también desempeña un papel fundamental en la fijación biológica del nitrógeno. Estas bacterias pueden producir vitaminas, aminoácidos, sideróforos y auxinas, contribuyendo al desarrollo vegetal en diversos sistemas agrícolas (Mng'ong'o et al., 2023; Purwaningsih et al., 2021).

Por otro lado, *Rhodobacter* participa en procesos de desnitrificación, transformando los nitratos en óxidos de nitrógeno y reduciendo así la pérdida de este elemento hacia cuerpos de agua cercanos (Green et al., 2012; Kostka et al., 2012). A nivel de oxidación del amonio, *Nitrospira* cumple un papel esencial, ya que está asociada con la nitrificación en suelos agrícolas altamente fertilizados. Estas bacterias pertenecen al complejo comammox, responsable de la oxidación completa del amonio a nitrato (Han et al., 2017; Li et al., 2019; Lu et al., 2020).

Bacterias con potencial biocontrolador y actividad antimicrobiana

Algunas bacterias rizosféricas del café presentan características que las convierten en agentes de biocontrol contra hongos fitopatógenos o microorganismos competidores. El género *Amycolatopsis*, también dentro del filo Acidobacteria, produce compuestos antifúngicos con potencial de controlar *Fusarium graminearum* en ecosistemas tipo milpa en México (Khalil et al., 2017; Mertz & Yao, 1993; Cabrera et al., 2020). Chitinophaga, por su parte, posee hábitos quitinolíticos, degradando la quitina, principal componente de los hongos, y liberando moléculas nitrogenadas. Este proceso ha motivado su uso como agente de control biológico frente a hongos fitopatógenos (Sharma et al., 2020; Ahmad et al., 2022; Kim et al., 2023).

El género *Haliangium*, perteneciente al grupo de las mixobacterias, se caracteriza por su comportamiento depredador. Una especie representativa, *Haliangium ochraceum*, ha demostrado capacidad para inhibir el crecimiento de Fusarium en ensayos de laboratorio, lo que sugiere un rol potencial en el control natural de enfermedades radiculares (Groß et al., 2023; Petters et al., 2021). Asimismo, *Streptomyces* constituye un género relevante en el equilibrio microbiano del suelo. Estas bacterias, simbiontes de plantas y otros microorganismos, pueden dispersar sus esporas mediante bacterias grampositivas o negativas, integrándose en la red trófica rizosférica (Muok et al., 2021; Seipke et al., 2012). Algunas especies, como *Streptomyces lydicus*, son capaces de limitar el daño causado por *Alternaria alternata* en cultivos de pepino (Wang et al., 2020).

Géneros promotores del crecimiento vegetal y degradadores de compuestos orgánicos

Otras bacterias se distinguen por sus múltiples funciones en la promoción del crecimiento vegetal y en la degradación de contaminantes. *Burkholderia*, además de establecer interacciones simbióticas con hongos, puede promover el crecimiento vegetal mediante una mayor disponibilidad de nutrientes. Algunos miembros de la familia Burkholderiaceae producen compuestos volátiles solubles que reprimen enfermedades del suelo (Stopnisek et al., 2016; Vila et al., 2016; de Oliveira-Longatti et al., 2015; Oliveira-Longatti et al., 2013; Cain et al., 2000; Carrión et al., 2018).

Entre los géneros con mayor diversidad metabólica se encuentra *Pseudomonas*, considerado modelo en estudios de promoción del crecimiento vegetal. Este género puede solubilizar fosfatos, captar potasio, producir biosurfactantes, sideróforos, fitohormonas, antibióticos y compuestos volátiles (Sah & Singh, 2016; Bautista-Cruz et al., 2019; Chopra et al., 2020; Sutariati et al., 2020). *Steroidobacter*, en cambio, interviene en los ciclos biogeoquímicos del suelo, y su abundancia puede aumentar tras la aplicación de residuos vegetales, especialmente de soja. Además, puede verse favorecido por metabolitos de bacterias Rhizobiales (Gu et al., 2017). El género *Nocardioides*, conformado por bacterias grampositivas de morfología

variable (cocos o bacilos), tiene un alto potencial para degradar contaminantes orgánicos, utilizándolos como fuentes de carbono o nitrógeno (Hwang et al., 2020; Yoon & Park, 2006; Ma et al., 2023; Zhang et al., 2021). Incluso se ha reportado que *Nocardioides carbamazepini* puede degradar compuestos farmacéuticos como el ibuprofeno (Benedek et al., 2022).

Sphingobium y *Sphingomonas* también desempeñan un papel importante en la degradación de compuestos fenólicos. *Sphingobium* puede catabolizar ácidos fenólicos aleloquímicos y glicoalcaloides esteroideos tóxicos presentes en raíces de tomate (Nakayasu et al., 2023), mientras que algunas especies de *Sphingomonas* son capaces de utilizar fluoreno como única fuente de carbono, degradar fenantreno y tolerar condiciones de estrés hídrico (Asaf et al., 2020; Zhou et al., 2016). Finalmente, el género *Mycobacterium* comprende especies predominantemente inocuas, aunque algunas pueden alcanzar cierto grado de patogenicidad incluso en ambientes del suelo (Walsh et al., 2019).

Géneros menos estudiados, pero con potencial funcional

A pesar de los numerosos reportes sobre bacterias rizosféricas en café, existen géneros de los que se conoce poco acerca de su función ecológica específica. Entre ellos se incluyen *Niastella, Dongia, Pedomicrobium, Puia* y *Thermosporothrix*. Las tres primeras son bacterias gramnegativas aerobias, aunque *Pedomicrobium* puede sobrevivir en condiciones microaerobias. *Niastella* y *Puia* presentan forma de bacilo, siendo la primera, móvil y la segunda, inmóvil, mientras que *Dongia* no forma esporas (Gebers, 1981; Kim et al., 2016; Lv et al., 2017; Weon et al., 2006; Yabe et al., 2016). Por su parte, *Thermosporothrix* es una bacteria grampositiva formadora de esporas con micelio aéreo, encontrada en hojas en descomposición del suelo. Se ha reportado su capacidad para hidrolizar polisacáridos como celulosa, xileno, quitina y almidones (Yabe et al., 2016).

Tabla 1.

Géneros de bacterias identificados en cultivos de café mediante aproximaciones metagenómicas y sus funciones reportadas o potenciales

Función	Género	Referencias
Movilización y transformación de nutrientes	*Acidothermus*	Drever & Stillings, 1997; Richter et al., 2007.
	Chujaibacter	Xin et al., 2021; Zhang et al., 2023b; Behnke et al., 2021; Villamil et al., 2021.
	Dyella	Guo et al., 2016; Weon et al., 2009; Su et al., 2020.
	Edaphobaculum	Cao et al., 2017; Kruczyńska et al., 2023; Zhao et al., 2022.
	Granulicella	Kalam et al., 2020; Oshkin et al., 2019; Costa et al., 2020.

Función	Género	Referencias
Fijación y transformación del nitrógeno	*Bradyrhizobium*	Jones et al., 2016; Sugawara et al., 2011; Vaninsberghe et al., 2015; Colombi et al., 2023; Zhang et al., 2023a.
	Mesorhizobium	Knežević et al., 2022; Menéndez et al., 2020; Muleta et al., 2021.
	Rhizobium	Mng'ong'o et al., 2023; Purwaningsih et al., 2021.
	Rhodobacter	Green et al., 2012; Kostka et al., 2012.
	Nitrospira	Han et al., 2017; Li et al., 2019; Lu et al., 2020.
Biocontrolador y actividad antimicrobiana	*Amycolatopsis*	Khalil et al., 2017; Mertz & Yao 1993; Cabrera et al., 2020.
	Chitinophaga	Sharma et al., 2020; Ahmad et al., 2022; Kim et al., 2023.
	Haliangium	Groß et al., 2023; Petters et al., 2021.
	Streptomyces	Muok et al., 2021; Seipke et al., 2012; Wang et al., 2020.
Promotores del crecimiento vegetal y degradadores de compuestos orgánicos	*Burkholderia*	Stopnisek et al., 2016; Vila et al., 2016; de Oliveira-Longatti et al., 2015; Oliveira-Longatti et al., 2013; Cain et al., 2000; Carrión et al., 2018.
	Pseudomonas	Sah & Singh, 2016; Bautista-Cruz et al., 2019; Chopra et al., 2020; Sutariati et al., 2020.
	Steroidobacter	Gu et al., 2017.
	Nocardioides	Benedek et al., 2022; Hwang et al., 2020; Ma et al., 2023; Yoon & Park, 2006; Zhang et al., 2021.
	Sphingobium	Nakayasu et al., 2023.
	Sphingomonas	Asaf et al., 2020; Zhou et al., 2016.

Fuente: autores.

Hongos

El análisis metagenómico del microbioma de la rizosfera de plantas de café ha permitido identificar una comunidad fúngica diversa, compuesta principalmente por hongos de los filos Ascomycota, Basidiomycota y Mucoromycota. Dentro de esta comunidad se encontraron tanto géneros de reconocida utilidad agrícola, como *Trichoderma* y *Rhizophagus*, así como hongos fitopatógenos, entre ellos *Fusarium, Colletotrichum, Gibberella, Phoma y Pestalotiopsis* (Ochoa-Henriquez et al., 2024; de Sousa et al., 2022; Jurburg et al., 2020). Entre los géneros detectados, *Mortierella* se destaca por su presencia frecuente, siendo el género más reportado para los países analizados (Figura 4). También se reportó una presencia relevante *de Penicillium, Metarhizium, Trichoderma, Fusarium* y *Aspergillus* (Afridi et al., 2024; Gomes et al., 2024; Mulatu et al., 2022; Wu et al., 2025).

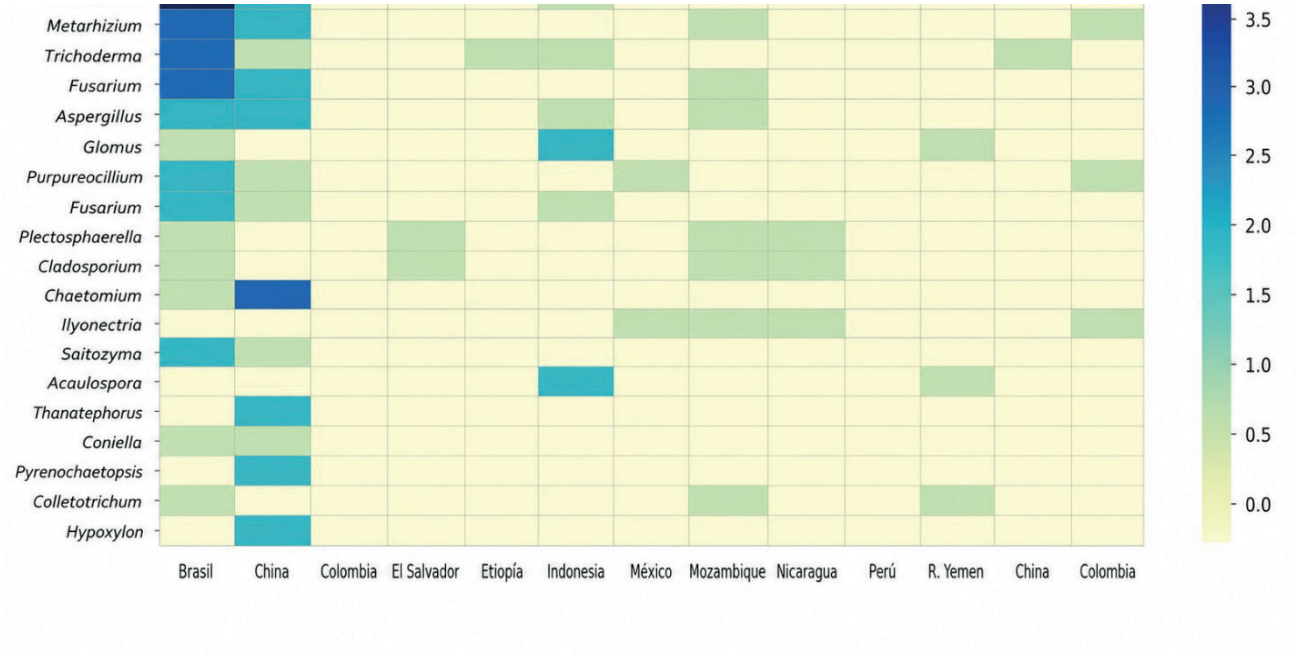


Figura 4. Diagrama de calor (*heatmap*) que muestra la frecuencia de reportes en la literatura consultada sobre géneros fúngicos detectados en distintos países productores de café

Fuente: autores.

Fusarium es un género ampliamente distribuido en suelos agrícolas y se caracteriza por adoptar distintos estilos de vida, que van desde formas saprofíticas, patógenas, hasta endofíticas. Especies como *Fusarium oxysporum* y *Fusarium xylarioides* han sido documentadas como causantes de la marchitez en cafetos. En particular, *F. xylarioides* presenta dos razas, una de ellas asociada a *C. canephora* y la otra a *C. arabica* (Bertrand et al., 2002; Olal et al., 2019). Además de su implicación en la marchitez vascular, *F. oxysporum* se ha vinculado a la enfermedad conocida como raíz corchosa, en la que actúa en asociación con *Meloidogyne arabicida*, generando condiciones que derivan en elevada mortalidad de plantas bajo condiciones de campo (Bertrand et al., 2002).

Aspergillus es el sexto género con mayor número de reportes (Figura 4); dentro de este género se encuentran varias especies cuyos roles funcionales aún no se han establecido. Sin embargo, investigaciones recientes indican que *Aspergillus niger* puede influir en el crecimiento de plántulas de café mediante mecanismos alternativos a la solubilización de fósforo, que es su función más documentada. Este efecto fue observado incluso en condiciones donde el fósforo no representaba una limitación, lo que sugiere rutas metabólicas adicionales, implicadas en la promoción del crecimiento (Araújo et al., 2020). Se ha señalado que la producción de ácidos orgánicos como el oxálico y el cítrico es clave en la solubilización de formas insolubles de fosfato como $AlPO_4$ y $FePO_4$, lo que podría explicar parte de su eficacia en

sistemas agrícolas con suelos ácidos (De Oliveira et al., 2014). Al contrario, otro estudio destaca la capacidad de *A. carbonarius, A. ochraceus,* y *A. westerdijkiae*, para producir micotoxinas, dentro de ellas la ocratoxina A que pueden afectar la salud humana por el consumo del café contaminado (das Neves et al., 2024).

Dentro de los hongos con potencial benéfico, *Trichoderma* ha sido ampliamente investigado por sus múltiples funciones en el manejo de enfermedades y la promoción del desarrollo vegetal. Este género se caracteriza por mecanismos como el micoparasitismo, la producción de compuestos antifúngicos, la competencia por nutrientes y espacio, y la modulación de respuestas fisiológicas de la planta huésped. Se ha reportado que la inoculación de *Trichoderma asperellum* en plantas de *C. canephora* reduce el tamaño de las lesiones foliares causadas por *Colletotrichum cairnsense*, patógeno responsable de la antracnosis (Wang et al., 2023). Asimismo, *T. asperellum* y *T. longibrachiatum* han mostrado eficacia en la inhibición del crecimiento de *F. xylarioides* en condiciones *in vitro*, con niveles de reducción micelial cercanos al 80 % (Mulatu et al., 2022). Algunas especies endofíticas del mismo género, aisladas de raíces de cafetos sanos, también han evidenciado actividad antagonista frente a especies de *Fusarium*, lo cual abre la posibilidad de ampliar su uso en estrategias integradas de manejo. En regiones de Etiopía donde crece *C. arábica* de forma silvestre, la rizosfera alberga poblaciones diversas de *Trichoderma*, incluyendo especies con características particulares que podrían estar adaptadas a las condiciones locales y presentar eficacia en la supresión de *G. xylarioides* (Mulaw et al., 2010).

Por otro lado, también se han documentado efectos positivos de *Trichoderma* en el crecimiento vegetal. En diferentes ensayos, *Trichoderma harzianum* ha promovido el desarrollo de plántulas de *C. canephora*, incrementando tanto la biomasa aérea como la radicular, así como el número de hojas (Alves et al., 2023). En experiencias similares, se observaron efectos positivos al aplicar biocarbón enriquecido con *Trichoderma* en plántulas de *C. arabica* (Nastiti & Prayogo, 2020) y al incorporar *Trichoderma* sp. en el sustrato, con mejoras en el área foliar (Ala et al., 2020). Por su parte, *Trichoderma viride* mostró una influencia positiva en la tasa de crecimiento, germinación y elongación del hipocótilo en plántulas de café (Sopiana et al., 2018), lo que ha sido respaldado por varios estudios enfocados tanto en variedad robusta como en arábica.

La presencia de *Metarhizium* en la rizosfera del cafeto también ha despertado interés, en especial por la capacidad de algunas especies como *Metarhizium robertsii* de colonizar raíces, promover el desarrollo radicular y aumentar la densidad de los pelos absorbentes (Sasan y Bidochka, 2012). Además, se ha observado que esta especie puede mejorar el establecimiento de plántulas y ofrecer cierta protección frente al minador de las hojas (Franzin et al., 2022), lo cual puede ser relevante en contextos agroecológicos.

También es importante explorar el papel funcional de hongos menos estudiados, como los del género *Mortierella.* En esta revisión, el género *Mortierella* se identificó entre los más frecuentes en la rizosfera del

café, con reportes en Brasil, Nicaragua, El Salvador, Colombia, Perú y China (Gomes et al., 2024; Jurburg et al., 2020; Tapaça et al., 2024; Veloso et al., 2023; Wu et al., 2025). A pesar de su presencia recurrente, no se encontraron estudios que describan su función específica en el cultivo de café. No obstante, Liao (2021) señala que *Mortierella elongata* actúa como un promotor de crecimiento en otros sistemas agrícolas, particularmente en hortalizas y cereales.

Finalmente, en la rizosfera de *C. arabica* también se ha logrado aislar una nueva especie endofítica del género *Penicillium*, denominada *Penicillium coffeae*, registrada en muestras provenientes de Hawái. Esta especie muestra afinidad filogenética con otros miembros del grupo, como *P. fellutanum, P. charlesii, P. chermesinum, P. indicum, P. phoeniceum y P. brocae* (Peterson et al., 2005). Algunos de los aislados presentan la capacidad de producir ocratoxina A, una micotoxina de interés por su potencial toxicidad, aunque el papel ecológico de estos endófitos en la fisiología de la planta del café aún no ha sido plenamente comprendido (Vega et al., 2006).

Tabla 2.

Géneros de hongos identificados en cultivos de café mediante aproximaciones metagenómicas y sus funciones reportadas o potenciales

Función	Género	Referencias
Mejora en la absorción de nutrientes	*Acaulospora*	Al-Arequi et al., 2013; Bertolini et al., 2018; Farha et al., 2024; Moreira et al., 2018.
	Aspergillus	De Olivera et al., 2014.
	Glomus	Bertolini et al., 2018; Hernández-Acosta et al., 2018.
	Rhizophagus	Araújo et al., 2020.
Promoción del crecimiento vegetal	*Acaulospora*	Silveira et al., 2023.
	Aspergillus	Araújo et al., 2020; de Sousa et al., 2022.
	Glomus	Al-Areqi et al., 2013; Hernández-Acosta et al., 2018; Silveira et al., 2023.
	Metarhizium	Sasan & Bidochka, 2012.
	Mortierella	Liao, 2021.
	Penicillium	de Sousa et al., 2022.
	Rhizophagus	Araújo et al., 2020; Hernández-Acosta et al., 2018; Silveira et al., 2023.

Función	Género	Referencias
Promoción del crecimiento vegetal	*Talaromyces*	Moreira et al., 2018.
	Trichoderma	Alves et al., 2023; Nastiti y Prayogo, 2020; Mulatu et al., 2022; Sopiana et al., 2018; Wang et al., 2023.
Tolerancia al estrés	*Rhizophagus*	Moreira et al., 2018.
	Acaulospora	Andrade et al., 2010.
	Glomus	Andrade et al., 2010; de Sousa et al., 2022.
	Gigaspora	Andrade et al., 2010; Bertolini et al., 2018; Corazon-Guivin et al., 2023; de Sousa et al., 2022.
	Pochonia	de Sousa et al., 2022.
Antipatógenos	*Trichoderma*	Mulaw et al., 2010; de Sousa et al., 2022; Wang et al., 2023.
Entomopatógenos	*Metarhizium*	Franzin et al., 2022.
Micotoxinas	*Aspergillus*	das Neves et al., 2024; Wu et al., 2025.
	Penicillium	das Neves et al., 2024; Vega et al., 2006.
Patógenos	*Fusarium*	Peterson et al., 2005; Vega et al., 2006; Wu et al., 2025.
	Colletotrichum	Bertrand et al., 2002; Wang et al., 2023.
	Plectosphaerella	Olal et al., 2019.

Fuente: autores.

Micorrizas

En la naturaleza, los hongos formadores de micorrizas arbusculares (HMA) representan una de las asociaciones simbióticas más comunes y funcionales en la rizosfera de plantas de café, consolidándose como un componente en la dinámica ecológica del sistema suelo-raíz. Diferentes estudios consultados a nivel global indican que cerca del 90 % de las plantas superiores evaluadas en entornos naturales establecen relaciones mutualistas con estos hongos, las cuales se caracterizan por una colonización intracelular de la raíz por parte del micelio fúngico, favoreciendo el intercambio bidireccional de recursos: carbohidratos de origen vegetal son transferidos al hongo, mientras que este facilita la absorción de nutrientes minerales limitantes como el fósforo y el nitrógeno (De Beenhouwer et al., 2015; Shah, 2014).

En los sistemas de producción cafetera, la asociación con HMA es una constante biológica observada en distintas regiones y condiciones edafoclimáticas. Las raíces de *Coffea arabica* y *C. canephora* han mos-

trado una alta capacidad de micorrización, con estructuras típicas como hifas, vesículas y espirales, asociadas a una amplia diversidad de especies fúngicas (Moreira et al., 2018). En este contexto, se destaca el género *Glomus*, reportado como dominante en distintas zonas cafeteras del mundo. Por ejemplo, su prevalencia ha sido confirmada en Yemen (Al-Arequi et al., 2013), en plantaciones etíopes localizadas en Jimma (De Beenhouwer et al., 2015) y en cafetales de Chiapas, México, donde se identificaron al menos siete especies del género en la rizosfera de *C. canephora* (Bertolini et al., 2018).

De forma consistente, se ha documentado que la inoculación con especies como *Glomus claroideum*, *Glomus diaphanum* y *Glomus albidum* mejora significativamente el crecimiento vegetal, el vigor de las plántulas y el contenido nutricional foliar (Hernández-Acosta et al., 2018). El papel de las micorrizas como promotores del crecimiento vegetal ha sido un fenómeno bien documentado, y se cree que entre mayor compatibilidad se presente entre el HMA y la planta hospedera, se potencializa la efectividad de los efectos benéficos propios del microorganismo. En este sentido, es fundamental resaltar la importancia de la identificación de organismos nativos de los cafetales, como los más idóneos para su implementación en este sistema agrícola (Bertolini et al., 2018).

Las micorrizas no solo contribuyen a la promoción del crecimiento vegetal, también pueden incrementar la tolerancia de las plantas de café a diversos tipos de estrés abiótico. En particular, Moreira et al., (2018) demostraron que la inoculación con *Dentiscutata heterogama*, *Claroideoglomus etunicatum* y *Rhizophagus clarus* permite una mayor supervivencia y adaptación de las plantas de café en condiciones de sequía moderada, gracias al desarrollo de una red extra matricial de hifas que incrementa la absorción hídrica. Asimismo, el grado de humedad del suelo se identificó como un factor determinante en la colonización micorrícica, mientras que al 75 % de capacidad de campo se alcanza la mayor tasa de colonización, una humedad del 100 % reduce drásticamente la simbiosis, debido a una menor oxigenación y al posible desarrollo de organismos patógenos en el entorno radicular. Estos resultados son respaldados por De Sousa et al. (2022), quienes, mediante análisis de correspondencia canónica de secuencias metagenómicas, evidenciaron asociaciones específicas entre los géneros *Glomus*, *Rhizophagus*, *Gigaspora* y *Pochonia* con la capacidad de tolerancia a la sequía en distintas especies de café.

Además del estrés hídrico, los HMA contribuyen a la resistencia de las plantas frente a la contaminación por metales pesados. Andrade et al. (2010) reportaron que la presencia de estos hongos en la rizosfera puede reducir significativamente la toxicidad del cobre (Cu), protegiendo el desarrollo radicular y evitando los efectos nocivos sobre la fisiología vegetal. Esta capacidad de amortiguamiento de contaminantes evidencia su uso potencial en el manejo de suelos dedicados a la producción intensiva o suelos degradados.

En relación con los factores que modulan la estructura y diversidad de las comunidades de HMA, los datos revisados indican que variables edáficas como el contenido de fósforo, el pH y el nivel de nitrógeno en el

suelo presentan una influencia directa sobre la riqueza y composición fúngica asociada a raíces de café (De Beenhouwer et al., 2015; Bertolini et al., 2018). Contrario a ello, factores espaciales como la altitud, la distancia geográfica entre parcelas (inferiores a 82 km), o el contenido de materia orgánica, no se correlacionan significativamente con cambios en la comunidad micorrícica (De Beenhouwer et al., 2015).

La diversidad de HMA en los ecosistemas cafeteros es amplia, sin embargo, existen algunos géneros predominantes, como es el caso de *Glomus*, que fue reportado en Brasil, Yemen, México y Etiopía, lo cual muestra buena capacidad de adaptación a diferentes condiciones de suelo y especies de café (Al-Arequi et al., 2013; Bertolini et al., 2018; De Beenhouwer et al., 2015; de Sousa et al., 2022; Moreira et al., 2018).

Se han identificado otros géneros fúngicos con funciones relevantes en la rizosfera del café. *Acaulospora* se encontró en la segunda posición como el género más abundante en suelos cafetaleros de Etiopía, indicando una posible codominancia en determinadas condiciones edáficas (De Beenhouwer et al., 2015). Asimismo, *Rhizophagus* ha demostrado un papel funcional importante, ya que su inoculación ha resultado en plántulas más vigorosas y con mayor contenido de fósforo, especialmente cuando se emplea en combinación con fertilizantes fosfatados (Araújo et al., 2020). Además, se ha encontrado que la colonización por *Rhizophagus* está modulada por la concentración de sacarosa en la rizosfera, lo cual refleja una interacción molecular compleja entre las raíces de *Coffea* y los hongos simbiontes (de Sousa et al., 2022).

Así mismo, se reporta la presencia frecuente de *Gigaspora* en la microbiota asociada con sistemas cafetaleros, aunque su rol específico requiere mayor investigación. Su recurrencia en análisis metagenómicos sugiere una contribución significativa a la funcionalidad del microbioma del café, posiblemente asociada a mecanismos de resiliencia frente a condiciones adversas (Bertolini et al., 2018; Corazon-Guivin et al., 2023; de Sousa et al., 2022).

En la tabla 3 se presentan los géneros de hongos micorrícicos arbusculares reportados en la literatura, donde se encontró que estos constituyen un componente esencial de la rizosfera del café (Gomes et al., 2024; Wu et al., 2025). La diversidad de hongos micorrícicos asociados a cultivos de café muestra una marcada variación geográfica, reflejando tanto las condiciones edáficas regionales como el manejo agrícola empleado. En América Latina, particularmente en Brasil, México y Perú, predominan géneros como *Glomus*, *Acaulospora* y *Gigaspora*, con una mayor complejidad taxonómica registrada en Perú, donde se identifican hasta doce géneros distintos asociados a *C. arabica* (Corazon-Guivin et al., 2023).

En contraste, los estudios desarrollados en Yemen y Etiopía muestran comunidades más limitadas, con la presencia concurrente de *Archeospora*, *Scutellospora* y *Claroideoglomus* en *C. arabica* (Al-Areqi et al., 2013; de Beenhouwer et al., 2015). Por su parte, China e Indonesia presentan asociaciones micorrícicas que incluyen no solo géneros clásicos de hongos arbusculares, sino también hongos ectomicorrícicos, como *Hydnum y Agaricus* (Wu et al., 2025; Farha et

al., 2024). Su diversidad funcional, su capacidad de modular el crecimiento vegetal, su contribución a la nutrición y su rol en la mitigación de estreses abióticos, resaltan la importancia biológica de HMA en el ecosistema cafetero. El proceso de micorrización no solo es un fenómeno natural de las plantas, sino que es una estrategia ecológica con aplicaciones agronómicas para el desarrollo de bioproductos y su implementación en diferentes sistemas de manejo (Bertolini et al., 2018; de Sousa et al., 2022).

Tabla 3.

Micorrizas presentes en café

Géneros de micorrizas	País	Especies	Autor
Glomus, Gigaspora, Rhizophagus	Brasil	*C. arabica, C. canephora*	de Sousa et al., (2022).
Claroideoglomus, Rhizophagus, Clarus, Dentiscutata	Brasil	*C. arabica*	Moreira et al., (2018).
Glomerella, Agaricus	Brasil	*C. canephora*	Gomes et al., (2024).
Glomus, Acaulospora, Gigaspora, Sclerocystis, Scutellospora	México	*C. canephora*	Bertolini et al., (2018).
Glomus, Nanoglomus, Rhizoglomus, Acaulospora, Entrophospora, Funneliformis, Ambispora, Diversispora, Dominikia, Gigaspora, Sclerocystis, Sieverdingia	Perú	*C. arabica*	Corazon-Guivin et al., (2023).
Linnemannia, Mortierella, Podila	Mozambique	*C. arabica*	Tapaça et al., (2024).
Glomus, Scutellospora, Archeospora, Acaulospora, Gigaspora	Yemen	*C. arabica*	Al-Areqi et al., (2013).
Glomus, Claroideoglomus, Paraglomus, Ambispora, Archeospora	Etiopía	*C. arabica*	de Beenhouwer et al., (2015).
Linnemannia, Mortierella, Podila	Mozambique	*C. arabica*	Tapaça et al., 2024.
Acaulospora, Glomus	Indonesia	*C. canephora, C. liberica*	Farha et al., 2024; Kartika et al., 2019.
Hydnum, Mortierella, Oidiodendron, Agaricus	China	*C. arabica*	Wu et al., 2025.

Fuente: autores.

Impacto de los tipos de manejo en la diversidad y composición de microorganismos asociados a la rizosfera

La diversidad microbiana presente en la rizosfera de plantas de café puede variar según múltiples factores, entre ellos las condiciones ambientales, la especie cultivada, la posición geográfica, las características del suelo y el tipo de manejo agronómico implementado, como se observa en la tabla 4 (Ochoa-Henriquez et al., 2024; Veloso et al., 2023). En general, la diversidad alfa microbiana en sistemas cafeteros muestra patrones contrastantes dependiendo del gradiente ambiental o del manejo evaluado. Un estudio comparativo multinacional evidenció que la diversidad alfa bacteriana asociada a *C. arabica* difiere entre países e incluso entre muestras recolectadas dentro de un mismo territorio. Estas variaciones son aún más marcadas en la diversidad beta, dado que cada sitio presenta una comunidad microbiana distintiva (Bez et al., 2023; Ochoa-Henriquez et al., 2024). La altitud constituye un factor determinante en la composición fisicoquímica del suelo y, en consecuencia, en la diversidad microbiana. Se ha observado que la riqueza y diversidad bacteriana puede ser mayor alrededor de los 1030 m s. n. m., en comparación con zonas más bajas o más elevadas. En el caso de los hongos, este patrón no es tan evidente, especialmente al analizar la diversidad beta (Ge et al., 2023).

El manejo agronómico influye en la estructura del suelo mediante el uso de distintas enmiendas, como en la configuración espacial del cultivo. Diversos estudios indican que la transición entre sistemas orgánicos e intensivos no genera diferencias significativas en la diversidad alfa, aunque sí produce variaciones importantes en la diversidad beta (Caldwell et al., 2015; Carrasco-Espinosa et al., 2022; Andrade et al., 2023). Este mismo patrón ha sido reportado en sistemas de café intersembrados con urochloa (Bresciani et al., 2024). Otra variable relevante es la edad del cultivo: a medida que aumenta el tiempo de establecimiento, disminuye la riqueza de taxones microbianos (Zhao et al., 2018). El uso previo del suelo también influye sobre la riqueza microbiana, particularmente en los hongos, cuya diversidad aumenta cuando los suelos provienen de usos más intensivos o de bosques secundarios. Las bacterias, por el contrario, no muestran cambios marcados asociados a la historia del suelo (Jurburg et al., 2020; Yusuf et al., 2021). En cuanto al nivel de sombreado en cultivos de café, no se han encontrado diferencias significativas en la riqueza microbiana; los efectos sobre la diversidad alfa son mínimos, aunque la diversidad beta sí evidencia variaciones entre sistemas (Rao et al., 2020; Kutos et al., 2024).

La abundancia relativa de los géneros microbianos presentes en la rizosfera de *C. arabica* depende notablemente del sitio de muestreo y presenta patrones consistentes entre estudios. Un análisis multicéntrico en plantaciones de varios países identificó un núcleo común de géneros bacterianos compuesto por *Sphingobium*, *Rhizobium, Acidibacter, Sphingomonas, Burkholderia y Amycolatopsis*, presentes en más del 60 % de las muestras (Bez et al., 2023). Los sistemas

orgánicos tienden a favorecer la presencia de géneros fúngicos como *Mortierella*, así como de diversos grupos bacterianos, entre ellos *Rhizobiales, Acidibacter*, Adurb-Bin063-1, *Blastococcus* y *Pseudocoleophoma*, en respuesta a suelos con baja disponibilidad de P y al uso de enmiendas orgánicas. En contraste, géneros como *Nitrososphaera, Enterobacteriales, Xanthomonadales, Metarhizium, Saitozyma* y *Caulobacterales* se presentan con mayor frecuencia en suelos bajo manejo convencional, desempeñando funciones como nitrificación, respuesta a fertilización, degradación de contaminantes y biocontrol (Caldwell et al., 2015; Carrasco-Espinosa et al., 2022; Bresciani et al., 2024; Ochoa-Henriquez et al., 2024). Otros grupos pueden variar según la edad del cultivo; por ejemplo, *Nitrospira, Pseudomonas, Gemmatimonas*, Gp4, Gp6 y *Trichoderma* disminuyen su abundancia conforme se incrementa la edad de la plantación, lo que podría afectar negativamente la salud del suelo, dada su relevancia funcional (Zhao et al., 2018).

La especie de café es otro factor clave en la conformación del microbioma rizosférico. Se ha documentado que las comunidades microbianas de *C. racemosa, C. liberica* y *C. canephora* son más similares entre sí que respecto a *C. arabica*; estas cuatro especies, a su vez, se diferencian marcadamente de *C. stenophylla*. Aunque la diversidad alfa puede ser relativamente comparable entre algunas especies, la diversidad beta especialmente en hongos muestra variaciones significativas. Por ejemplo, *Penicillium, Pochonia* y *Saitozyma* presentan mayor abundancia relativa en *C. arabica* (de Sousa et al., 2022; Veloso et al., 2023). En bacterias, *Bradyrhizobium* es más común en *C. arabica*, mientras que *Sphingomonas* predomina en *C. canephora* (Veloso et al., 2023). Este patrón es similar a lo observado en el manejo del suelo, donde se presentan diferencias mínimas en la diversidad alfa, pero cambios marcados en la diversidad beta. En cuanto a rizobacterias diazotróficas, especies como *C. canephora* y *C. arabica* comparten únicamente entre el 30 % y el 40 % de los grupos taxonómicos fijadores de nitrógeno. Se han registrado géneros exclusivos en *C. arabica,* como *Burkholderia, Afipia, Allorhizobium, Ideonella, Mesorhizobium* y *Pseudoaminobacter*, mientras que en *C. canephora* se han identificado *Pseudoaminobacter, Anaeromyxobacter, Allorhizobium, Skermanella y Roseiarcus* (Bullergahn et al., 2024).

Incluso se han desarrollado estudios dirigidos a analizar el impacto de la variedad, el genotipo y los injertos en la microbiota rizosférica. En variedades de *C. arabica,* como Castillo-Tambo y Bourbon, se han encontrado diferencias en la diversidad beta, reflejadas en una mayor abundancia relativa de géneros como *Acidobacterium, Holophaga* y *Mucilaginibacter* en Bourbon, mientras que *Conexibacter* y *Burkholderia* predominan en Castillo-Tambo (SolisP et al., 2023). En otra investigación se evaluó la diversidad de microorganismos en seis genotipos de *C. canephora* var. Conilon, en esta se observó que uno de genotipos presentaba mayor inequidad microbiana, lo que pudo generar diferencias en su diversidad alfa y beta. En este mismo genotipo se identificó la presencia de fijadoras de nitrógeno pertenecientes al orden Rhizobiales y a la familia Beijerinckiaceae (Gomes et al., 2024). Los estudios

sobre injertos también han mostrado efectos relevantes. Experimentos con *C. canephora* injertado sobre patrones de *C. liberica* han evidenciado que la rizosfera del injerto robusta/libérica presenta un incremento en la abundancia de bacterias potencialmente beneficiosas como *Xanthobacteraceae, Gemmatimonadaceae, Rokubacteriales* y *Gemmatimonadota*. Al contrario, se presenta una disminución de hongos potencialmente patogénicos, lo que podría asociarse con una mayor resistencia al estrés generado por el cultivo continuo (Sun et al., 2024).

Finalmente, la diversidad microbiana en la rizosfera del café también puede ser modulada mediante estrategias de bioestimulación y biocontrol. Estudios que emplean exudados radiculares o rizobacterias benéficas han reportado cambios marcados en la estructura microbiana del suelo, incrementando tanto la diversidad como la abundancia de grupos funcionales de interés. Por ejemplo, la palmera de areca (*Areca catechu*) puede alterar significativamente la composición microbiana en sistemas de café, favoreciendo géneros asociados con la degradación de compuestos y la disponibilidad de nutrientes (Zhao et al., 2023). Aunque aún no se ha evaluado su impacto en la diversidad microbiana de *C. arabica*, se ha demostrado que rizobacterias productoras de ACC desaminasa, como ciertos miembros del género *Pantoea* pueden inducir tolerancia al estrés hídrico y aumentar la biomasa radical, posiblemente asociándose a cambios favorables en la estructura microbiana del suelo. En este sentido, futuras investigaciones deberían incluir una caracterización ecológica más detallada de estos sistemas (Jasso-Arreola et al., 2025).

Tabla 4.

Impacto de la diversidad de hongos y bacterias bajo diferentes factores presentes en el cultivo

Factor	Efecto en bacterias	Efecto en hongos	Referencias
Altitud	Mayor riqueza y diversidad alfa alrededor de 1030 msnm; diferencias claras en diversidad beta entre sitios.	La altitud no afecta fuertemente la diversidad beta; menor sensibilidad que bacterias.	Ge et al., 2023
Variación geográfica / Sitio de muestreo	Diversidad alfa y beta difieren entre países y entre fincas del mismo país; cada sitio tiene una comunidad característica. Presencia de un núcleo común (*Sphingobium, Rhizobium, Acidibacter, Sphingomonas, Burkholderia, Amycolatopsis*).	Variación entre sitios, especialmente en diversidad beta.	Bez et al., 2023; Ochoa-Henriquez et al., 2024

Factor	Efecto en bacterias	Efecto en hongos	Referencias
Manejo orgánico vs. convencional	Orgánico: mayor presencia de *Rhizobiales, Acidibacter, Adurb-Bin063-1, Blastococcus y Pseudocoleophoma*. Convencional: mayor presencia de *Nitrososphaera, Enterobacteriales, Xanthomonadales, Caulobacterales*.	Orgánico: incremento de *Mortierella / Mortierellomycota*. Convencional: mayor abundancia de *Metarhizium y Saitozyma*.	Caldwell et al., 2015; Carrasco-Espinosa et al., 2022; Bresciani et al., 2024; Ochoa-Henriquez et al., 2024
Edad del cultivo	Disminución de géneros benéficos: *Nitrospira, Pseudomonas, Gemmatimonas, Gp4, Gp6,* relacionados con salud del suelo.	Trichoderma disminuye con la edad (pérdida de potencial de biocontrol).	Zhao et al., 2018
Uso previo del suelo	Sin cambios marcados en riqueza bacteriana según historia del suelo.	Mayor riqueza de hongos cuando el suelo proviene de usos intensivos o bosques secundarios.	Jurburg et al., 2020; Yusuf et al., 2021
Sombreado en el cultivo	No afecta la riqueza ni diversidad alfa; sí modifica la diversidad beta.	Cambios detectables principalmente en diversidad beta.	Rao et al., 2020; Kutos et al., 2024
Especie de café	*Bradyrhizobium* más abundante en *C. arabica*; Sphingomonas más abundante en *C. canephora*. Rizobacterias diazotróficas comparten solo 30–40% entre especies.	*Penicillium, Pochonia y Saitozyma* más abundantes en *C. arabica*. Alta diferenciación en diversidad beta.	de Souza et al., 2022; Veloso et al., 2023; Bullergahn et al., 2024
Variedad / Genotipo	Diferencias por variedad (ej. Bourbon vs. Castillo-Tambo). En genotipos de *C. canephora*, aparición de Rhizobiales y Beijerinckiaceae en algunos grupos.	Diversidad beta fuertemente diferenciada por genotipo.	Solis Pino et al., 2023; Gomes et al., 2024
Injertos	Injertos Robusta sobre Liberica incrementan Xanthobacteraceae, Gemmatimonadaceae, Rokubacteriales; reducen grupos bacterianos potencialmente dañinos.	Reducción de hongos patogénicos en sistemas injertados.	Sun et al., 2024
Bioestimulación / Exudados / ACC desaminasa	Aumento de géneros benéficos como *Pantoea*; cambios estructurales fuertes en la comunidad.	Incremento de microorganismos degradadores o asociados a disponibilidad de nutrientes.	Zhao et al., 2023; Jasso-Arreola et al., 2025

Fuente: autores.

Perspectivas a futuro

La rizosfera es un elemento importante para determinar las características fisiológicas de la planta, esta puede ser abordada desde diferentes áreas de la biotecnología para potenciar el rendimiento de los cultivos con un menor impacto ambiental. Una de las principales alternativas para evaluar el impacto del manejo agrícola es hacer evaluaciones constantes utilizando técnicas de secuenciación de nueva generación, esto permitirá mejorar las prácticas para obtener productos sostenibles (Jan-Roblero et al., 2024). Otra alternativa es inocular este tipo de cultivos con microorganismos beneficiosos, como hongos micorrícicos arbusculares (*arbuscular mycorrhizal fungi,* AMF) y rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (*plant growth-promoting rhizobacteria,* PGPR), estos pueden mejorar el crecimiento de las plantas, la adquisición de nutrientes y la tolerancia al estrés con una menor aplicación de fertilizantes (Begum et al., 2019; Ahmad et al., 2022). Actualmente existe un creciente interés por generar proceso de optimización de la rizosfera utilizando la ingeniería microbiana, en esta se realiza la combinación de múltiples microorganismos aplicando metodologías que van desde el modelamiento de las comunidades, usando herramientas de programación, hasta aplicación de esos consorcios en campo, esto puede potenciar las características positivas para el suelo y los cultivos (Shayanthan et al., 2022).

4 CONCLUSIONES

A partir del análisis exhaustivo de la rizosfera del café, se evidencia el papel fundamental que desempeñan los microorganismos en la salud y productividad del cultivo. Las bacterias y hongos presentes en este entorno no solo contribuyen a la disponibilidad de nutrientes y la promoción del crecimiento vegetal, sino que también ofrecen mecanismos de defensa contra patógenos y factores de estrés abiótico. Géneros como *Trichoderma*, *Rhizophagus* y *Pseudomonas* han demostrado un potencial significativo en el manejo biológico y la biofertilización, lo cual podría favorecer la transición hacia una agricultura más sostenible. Además, se destaca la importancia del tipo de manejo agronómico y las condiciones edafoclimáticas en la configuración de la comunidad microbiana, lo que sugiere la necesidad de prácticas agrícolas adaptativas y localizadas.

En este sentido, las investigaciones futuras deben centrarse en la integración de tecnologías avanzadas como la secuenciación de nueva generación y la ingeniería microbiana para caracterizar, monitorear y optimizar las comunidades microbianas del café. La inoculación dirigida con consorcios microbianos benéficos, junto con la identificación de especies nativas adaptadas a condiciones específicas, representa una estrategia prometedora para aumentar la

resiliencia del cultivo y mejorar su rendimiento sin comprometer el medio ambiente. Así, comprender y manejar de forma estratégica la rizosfera es una herramienta esencial para enfrentar los desafíos de la producción cafetera moderna en un contexto de cambio climático y creciente demanda de prácticas agrícolas sostenibles.

CONTRIBUCIÓN DE LA AUTORÍA

Autor 1: conceptualización, metodología, investigación, análisis de datos, redacción, borrador original, revisión y edición.

Autor 2: investigación, análisis de datos, redacción, borrador original, revisión y edición.

Autor 3: adquisición de recursos, administrador del proyecto, supervisión, logística, revisión y edición.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este documento agradecen a la Universidad de Cundinamarca y al personal de esta institución que hizo posible el desarrollo del proyecto "Influencia del manejo convencional y orgánico sobre la composición de la comunidad de bacterias rizosféricas en sistemas agrícolas; una aproximación desde la metagenómica", así como al grupo de investigación Agrobiología Tropical (ABT), el cual está integrado por profesionales que brindaron su conocimiento y orientación para la realización de este trabajo.

FINANCIAMIENTO

La Universidad de Cundinamarca dio su apoyo económico para el financiamiento del proyecto número 254, titulado "Influencia del manejo convencional y orgánico sobre la composición de la comunidad de bacterias rizosféricas en sistemas agrícolas; una aproximación desde la metagenómica". Mediante la VI convocatoria Interna Periodo 2023- 2 – Ucundinamarca Generación Siglo XXI, del cual deriva este trabajo.

USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Se empleó la inteligencia artificial para la búsqueda de información científica en Ought. (2025). *Elicit* [AI research assistant]. https://elicit.org/, la cual fue recopilada, analizada y usada para la escritura del presente artículo por los autores.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

LITERATURA CITADA

Afridi, M. S., Schulman, P., Lacerda, V. N. C., Guimaraes, R. A., & Vasconcelos de Medeiros, F. H. (2024). Long-term benefit contribution of chemical and biological nematicide in coffee nematode management in soil microbial diversity and crop yield perspectives. *Microbiological Research, 282*, 127638. https://doi.org/10.1016/j.micres.2024.127638

Ahmad, H. M., Fiaz, S., Hafeez, S., Zahra, S., Shah, A. N., Gul, B., Aziz, O., Mahmood-Ur-Rahman, Fakhar, A., Rafique, M., Chen, Y., Yang, S. H., & Wang, X. (2022). Plant growth-promoting rhizobacteria eliminate the effect of drought stress in plants: A review. *Frontiers in Plant Science, 13*, 875774. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.875774

Ahmad, M., Varela Alonso, A., Koletti, A. E., Assimopoulou, A. N., Declerck, S., Schneider, C., & Molin, E. M. (2022). Transcriptional dynamics of *Chitinophaga* sp. Strain R-73072-mediated alkannin/shikonin biosynthesis in *Lithospermum officinale*. *Frontiers in Microbiology, 13*, 978021. https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.978021

Ala, A., Musa, Y., & Kadola, L. (2020). Effect of compost enrichment with Trichoderma sp on the growth of Arabica coffee seedlings. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 575*(1), 012145. https://doi.org/10.1088/1755-1315/575/1/012145

Al-Arequi, A., Chliyeh, M., Sghir, F., Ouazzani Touhami, A., Benkirane, R., & Douira, A. (2013). Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in the rhizosphere of Coffea arabica in the Republic of Yemen. *Journal of Applied Biosciences, 64*(1), 4888-4901. https://doi.org/10.4314/jab.v64i1.88478

Alves, J. R., Celestino, F. N., de Moraes, A. G., dos Reis, R. A., & Grecco, E. D. (2023). Growth promoting fungi increase the quality of Coffea canephora seedlings Pierre ex a. Froehner. *Coffee Science, 18*, e182089-e182089. https://doi.org/10.25186/.v18i.2089

Andrade, P. H. M., Machado, P. C., Paula, A. F., Paganin, A. C. L., Rezende, G. S., Matheucci, E., Carvalho, L. M., Freire, C. C. M., Cunha, A. F., & Lacava, P. T. (2023). 16S metabarcoding analysis reveals the influence of organic and conventional farming practices on bacterial communities from the rhizospheric of *Coffea arabica* L. *Brazilian Journal of Biology, 83*. https://doi.org/10.1590/1519-6984.274070

Andrade, S. A. L., Silveira, A. P. D., & Mazzafera, P. (2010). Arbuscular mycorrhiza alters metal uptake and the physiologi-

cal response of *Coffea arabica* seedlings to increasing Zn and Cu concentrations in soil. *Sci. Total Environ, 408*(22), 5381-5391. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.07.064

Araújo, V. C., Rossati, K. F., Xavier, L. V., Oliveira, V. A. De, Carmo, G. J. Dos S., Assis, G. A. De, & Mendes, G. De O. (2020). Enhanced growth in nursery of coffee seedlings inoculated with the rhizosphere fungus *Aspergillus niger* for field transplantation. *Rhizosphere, 15*, 100236. https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2020.100236

Asaf, S., Numan, M., Khan, A. L., & Al-Harrasi, A. (2020). Sphingomonas: from diversity and genomics to functional role in environmental remediation and plant growth. *Critical Reviews in Biotechnology, 40*(2), 138-152. https://doi.org/10.1080/07388551.2019.1709793

Bautista-Cruz, A., Antonio-Revuelta, B., del Carmen Martínez Gallegos, V., & Báez-Pérez, A. (2019). Phosphate-solubilizing bacteria improve Agave angustifolia Haw. Growth under field conditions. *Journal of the Science of Food and Agriculture, 99*(14), 6601-6607. https://doi.org/10.1002/jsfa.9946

Begum, N., Qin, C., Ahanger, M. A., Raza, S., Khan, M. I., Ashraf, M., Ahmed, N., & Zhang, L. (2019). Role of arbuscular mycorrhizal fungi in plant growth regulation: Implications in abiotic stress tolerance. *Frontiers in Plant Science, 10*, 1068. https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01068

Behnke, G. D., Kim, N., Zabaloy, M. C., Riggins, C. W., Rodriguez-Zas, S., & Villamil, M. B. (2021). Soil microbial indicators within rotations and tillage systems. *Microorganisms, 9*(6), 1244. https://doi.org/10.3390/microorganisms9061244

Bekele, G. K., Abda, E. M., Tuji, F. A., Meka, A. F., & Gemeda, M. T. (2025). Shotgun Metagenomics Reveals Metabolic Potential and Functional Diversity of Microbial Communities of Chitu and Shala Soda Lakes in Ethiopia. *Microbiology Research, 16*(3), 71. https://doi.org/10.3390/microbiolres16030071

Benedek, T., Pápai, M., Gharieb, K., Bedics, A., Táncsics, A., Tóth, E., Daood, H., Maróti, G., Wirth, R., Menashe, O., Bóka, K., & Kriszt, B. (2022). *Nocardioides carbamazepini* sp. nov., an ibuprofen degrader isolated from a biofilm bacterial community enriched on carbamazepine. *Systematic and Applied Microbiology, 45*(4). https://doi.org/10.1016/j.syapm.2022.126339

Bertolini, V., Montaño, N. M., Chimal Sánchez, E., Varela Fregoso, L., Gómez Ruiz, J., & Martínez Vázquez, J. M. (2018). Abundance and richness of arbuscular mycorrhizal fungi in coffee plantations from Soconusco, Chiapas, Mexico. *Revista de Biología Tropical, 66*(1), 91-105. https://doi.org/10.15517/rbt.v66i1.27946

Bertrand, B., Ramirez, G., Topart, P., & Anthony, F. (2002). Resistance of cultivated coffee (*Coffea arabica* and *C. canephora*) trees to corky-root caused by *Meloidogyne arabicida* and *Fusarium oxysporum*, under controlled and field conditions. *Crop*

Protection, 21(9), 713-719. https://doi.org/10.1016/S0261-2194(02)00028-5

Bez, C., Esposito, A., Musonerimana, S., Nguyen, T. H., Navarro-Escalante, L., Tesfaye, K., Turello, L., Navarini, L., Piazza, S., & Venturi, V. (2023). Comparative study of the rhizosphere microbiome of *Coffea arabica* grown in different countries reveals a small set of prevalent and keystone taxa. *Rhizosphere, 25,* 100652. https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2022.100652

Bresciani, L., Freitas, C. C. G., Barros, F. M. Do R., Andreote, F. D., & Dini-Andreote, F. (2024). Partitioning the effects of coffee-*Urochloa* intercropping on soil microbial properties at a centimeter-scale. *Applied Soil Ecology, 195,* 105264. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2023.105264

Broeckling, C. D., Paschke, M. W., Vivanco, J. M., & Manter, D. (2019). Rhizosphere Ecology. *Encyclopedia of Ecology, 3,* 574-578). https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.11132-7

Brtnicky, M., Kintl, A., Hammerschmiedt, T., Mustafa, A., Elbl, J., Kucerik, J., Vyhnanek, T., Skladanka, J., Hunady, I., & Holatko, J. (2021). Clover species specific influence on microbial abundance and associated enzyme activities in rhizosphere and non-rhizosphere soils. *Agronomy, 11*(11), 2214. https://doi.org/10.3390/agronomy11112214

Bullergahn, V. B., Menezes, K. M. S., Veloso, T. G. R., da Luz, J. M. R., Castanheira, L. F., Pereira, L. L., & Soares da Silva, M. d. C. (2024). Diversity of potential nitrogen-fixing bacteria from rhizosphere of the *Coffea arabica* L. and *Coffea canephora* L. *3 Biotech, 14*(1), 27. https://doi.org/10.1007/s13205-023-03875-7

Cabrera, R., García-López, H., Aguirre-von-Wobeser, E., Orozco-Avitia, J. A., & Gutiérrez-Saldaña, A. H. (2020). *Amycolatopsis* BX17: An actinobacterial strain isolated from soil of a traditional *milpa* agroecosystem with potential biocontrol against *Fusarium graminearum*. *Biological Control, 147,* 104285. https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2020.104285

Cain, C. C., Henry, A. T., Waldo, R. H., Casida, J., & Falkinham, J. O. (2000). Identification and characteristics of a novel *Burkholderia* strain with broad-spectrum antimicrobial activity. *Applied and Environmental Microbiology, 66*(9), 4139-4141. https://doi.org/10.1128/AEM.66.9.4139-4141.2000

Caldwell, A. C., Silva, L. C. F., da Silva, C. C., & Ouverney, C. C. (2015). Prokaryotic Diversity in the Rhizosphere of Organic, Intensive, and Transitional Coffee Farms in Brazil. *PLoS ONE, 10*(6), e0106355. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0106355

Campos Trigoso, J.-A., Murga Valderrama, N. L., Rituay Trujillo, P. A. y García Rosero, L. M. (2021). Sostenibilidad del café: revisión sistemática de la literatura. *Revista Venezolana de Gerencia, 26*(95), 943-961. https://doi.org/10.52080/rvgluz.27.95.30

Cao, M., Huang, J., Li, J., Qiao, Z., & Wang, G. (2017). *Edaphobaculum flavum* gen. nov., sp. nov., a member of family *Chi-*

tinophagaceae, isolated from grassland soil. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 67*(11), 4475-4481. https://doi.org/10.1099/ijsem.0.002316

Carrasco-Espinosa, K., Avitia, M., Barrón-Sandoval, A., Abbruzzini, T. F., Salazar Cabrera, U. I., Arroyo-Lambaer, D., Uscanga, A., Campo, J., Benítez, M., Wegier, A., Rosell, J. A., Reverchon, F., Hernández, G., Boege, K. & Escalante, A. E. (2022). Land-Use Change and Management Intensification Is Associated with Shifts in Composition of Soil Microbial Communities and Their Functional Diversity in Coffee Agroecosystems. *Microorganisms, 10*(9), 1763. https://doi.org/10.3390/microorganisms10091763

Carrión, V. J., Cordovez, V., Tyc, O., Etalo, D. W., de Bruijn, I., de Jager, V. C. L., Medema, M. H., Eberl, L., & Raaijmakers, J. M. (2018). Involvement of Burkholderiaceae and sulfurous volatiles in disease-suppressive soils. The *ISME Journal, 12*(9), 2307-2321. https://doi.org/10.1038/s41396-018-0186-x

Chopra, A., Bobate, S., Rahi, P., Banpurkar, A., Mazumder, P. B., & Satpute, S. (2020). *Pseudomonas aeruginosa* RTE4: A Tea Rhizobacterium with Potential for Plant Growth Promotion and Biosurfactant Production. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 8,* 861. https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00861

Colombi, E., Hill, Y., Lines, R., Sullivan, J. T., Kohlmeier, M. G., Christophersen, C. T., Ronson, C. W., Terpolilli, J. J., & Ramsay, J. P. (2023). Population genomics of Australian indigenous *Mesorhizobium* reveals diverse nonsymbiotic genospecies capable of nitrogen-fixing symbioses following horizontal gene transfer. *Microbial Genomics, 9*(1). https://doi.org/10.1099/mgen.0.000918

Corazon-Guivin, M. A., Romero-Cachique, G., Del Aguila, K. M., Padilla-Domínguez, A., Hernández-Amasifuen, A. D., Cerna-Mendoza, A., Coyne, D., & Oehl, F. (2023). *Rhizoglomus* variabile and *Nanoglomus plukenetiae*, Native to Peru, Promote Coffee Growth in Western Amazonia. *Microorganisms, 11*(12), 2883. https://doi.org/10.3390/microorganisms11122883

Costa, O. Y. A., Pijl, A., & Kuramae, E. E. (2020). Dynamics of active potential bacterial and fungal interactions in the assimilation of acidobacterial EPS in soil. *Soil Biology and Biochemistry, 148,* 107916. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107916

das Neves, T. T., de Jesus Cassimiro, D. M., de Souza, J. G. D. L., de Souza Castro, C. R., Schwan, R. F., Batista, L. R., & Silva, C. F. (2024). Inhibition of *Aspergillus* spp. growth and ochratoxin A production in Conilon and Arabica coffees based-medium by *Saccharomyces cerevisiae*. *International Journal of Food Microbiology, 425*, 110875. https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2024.110875

Davis, A. P., Govaerts, R., Bridson, D. M., & Stoffelen, P. (2006). An annotated taxonomic conspectus of the genus Coffea

(Rubiaceae). *Botanical Journal of the Linnean Society, 152*(4), 465-512. https://doi.org/10.1111/j.1095-8339.2006.00584.x

de Beenhouwer, M., Van Geel, M., Ceulemans, T., Muleta, D., Lievens, B., & Honnay, O. (2015). Changing soil characteristics alter the arbuscular mycorrhizal fungi communities of Arabica coffee (*Coffea arabica*) in Ethiopia across a management intensity gradient. *Soil Biology and Biochemistry, 91*, 133-139. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.08.037

de Oliveira-Longatti, S. M., Martins de Sousa, P., Marciano Marra, L., Avelar Ferreira, P. A., & de Souza Moreira, F. M. (2015). *Burkholderia fungorum* promotes common bean growth in a dystrophic oxisol. *Annals of Microbiology, 65*(4), 1825-1832. https://doi.org/10.1007/s13213-014-1020-y

de Oliveira Mendes, G., Moreira de Freitas, A.L., Liparini Pereira, O. et al. (2014). Mechanisms of phosphate solubilization by fungal isolates when exposed to different P sources. *Ann Microbiol, 64*, 239-249. https://doi.org/10.1007/s13213-013-0656-3

de Sousa, L. P., Filho, O. G., & Mondego, J. M. C. (2023). Age-Related Rhizosphere Analysis of *Coffea arabica* Plants. *Current Microbiology, 80*(4), 130. https://doi.org/10.1007/s00284-023-03236-w

de Sousa, L. P., Guerreiro-Filho, O., & Mondego, J. M. C. (2022). The Rhizosphere Microbiomes of Five Species of Coffee Trees. *Microbiology Spectrum, 10*(2). https://doi.org/10.1128/spectrum.00444-22

Drever, J. I., & Stillings, L. L. (1997). The role of organic acids in mineral weathering. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 120*(1-3), 167-181. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S092777579603720X

Duong, B., Nguyen, H. X., Phan, H. V., Colella, S., Trinh, P. Q., Hoang, G. T., Nguyen, T. T., Marraccini, P., Lebrun, M., & Duponnois, R. (2021). Identification and characterization of Vietnamese coffee bacterial endophytes displaying *in vitro* antifungal and nematicidal activities. *Microbiological Research, 242*, 126613. https://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126613

El- Shatnawi, M. K. J., & Makhadmeh, I. M. (2001). Ecophysiology of the Plant–Rhizosphere System. *Journal of Agronomy and Crop Science, 187*(1), 1-9. https://doi.org/10.1046/j.1439-037X.2001.00498.x

Farha, A., Fatimah, I. N., Ade, M. A., Hidayati, R. F., Lili, D., Merry, M. G., & Aidil, A. (2024). Colonization of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) in the rhizosphere of robusta coffee plant (*Coffea canephora*). E3S Web of Conferences, *577*, 02018). EDP Sciences. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202457702018

Franzin, M. L., Moreira, C. C., da Silva, L. N. P., Martins, E. F., Fadini, M. A. M., Pallini, A., Elliot, S. L., & Venzon, M. (2022). Metarhizium associated with coffee seedling roots: positive effects on plant growth and protection against Leucoptera coffeella. *Agriculture, 12*(12), 2030. https://doi.org/10.3390/agriculture12122030

Ge, Y., Zhang, F., Xie, C., Qu, P., Jiang, K., Du, H., Zhao, M., Lu, Y., Wang, B., Shi, X., Li, X., & Zhang, C. (2023). Effects of Different Altitudes on *Coffea arabica* Rhizospheric Soil Chemical Properties and Soil Microbiota. *Agronomy, 13*(2), 471. https://doi.org/10.3390/agronomy13020471

Gebers, R. (1981). Enrichment, Isolation, and Emended Description of Pedomicrobium ferrugineum Aristovskaya and Pedomicrobium manganicum Aristovskaya. *International Journal of Systematic Bacteriology*, *31*(3) https://www.microbiologyresearch.org/content/journal/ijsem/10.1099/00207713-31-3-302

Gomes, W. d. S., Partelli, F. L., Veloso, T. G. R., Soares da Silva, M. d. C., Moreli, A. P., Moreira, T. R., Pereira, L. L., & Louwzada Pereira, L. (2024). Effects of *Coffea canephora* genotypes on the microbial community of soil and fruit. *Scientific Reports, 14*, 29035. https://doi.org/10.1038/s41598-024-80403-4

Green, S. J., Prakash, O., Jasrotia, P., Overholt, W. A., Cardenas, E., Hubbard, D., Tiedje, J. M., Watson, D. B., Schadt, C. W., Brooks, S. C., & Kostka, J. E. (2012). Denitrifying bacteria from the genus *Rhodanobacter* dominate bacterial communities in the highly contaminated subsurface of a nuclear legacy waste site. *Applied and Environmental Microbiology, 78*(4), 1039-1047. https://doi.org/10.1128/AEM.06435-11

Groß, V., Reinhard, A., Petters, S., Pichler, M., & Urich, T. (2023). Adding complexity to soil food webs: Myxobacteria have broad predation spectra with bacteria, yeasts and filamentous fungi in vitro. *European Journal of Soil Biology, 117*. https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2023.103508

Gu, Y., Wang, Y., Lu, S., Xiang, Q., Yu, X., Zhao, K., Zou, L., Chen, Q., Tu, S., & Zhang, X. (2017). Long-term fertilization structures bacterial and archaeal communities along soil depth gradient in a paddy soil. *Frontiers in Microbiology, 8*. https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01516

Guo, L., Zheng, S., Cao, C., & Li, C. (2016). Tillage practices and straw-returning methods affect topsoil bacterial community and organic C under a rice-wheat cropping system in central China. *Scientific Reports, 6*, 33155. https://doi.org/10.1038/srep33155

Haldar, S., & Sengupta, S. (2015). Plant-microbe Cross-talk in the Rhizosphere: Insight and Biotechnological Potential. *The Open Microbiology Journal, 9*(1), 1-7. https://doi.org/10.2174/1874285801509010001

Han, S., Luo, X., Liao, H., Nie, H., Chen, W., & Huang, Q. (2017). *Nitrospira* are more sensitive than *Nitrobacter* to land management in acid, fertilized soils of a rapeseed-rice rotation field trial. *Science of the Total Environment, 599-600*, 135-144. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.086

Hernández-Acosta, E., Trejo-Aguilar, D., Ferrera-Cerrato, R., Rivera-Fernández, & González-Chávez, M. C. (2018). Hongos micorrízicos arbusculares en el crecimiento de café (Coffea arabica L.) Variedades Garnica, Catimor, Caturra y Catuaí.

Agroproductividad, 11(4), 61-67. https://mail.revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/es/article/view/352

Hindersah, R., & Asyiah, I. N. (2023). Abundance of Beneficial Soil Microbes in the Rhiosphere of Coffee Plants Infected by Pratylenchus coffeae. Biosaintifika: *Journal of Biology & Biology Education, 15*(2), 220-229. https://doi.org/10.15294/biosaintifika.v15i2.43085

Hwang, Y. J., Son, J. S., Lee, S. Y., He, Y., Jo, Y., Shin, J. H., & Ghim, S. Y. (2020). *Nocardioides sambongensis* sp. Nov., isolated from dokdo islands soil. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 70*(1), 16-22. https://doi.org/10.1099/ijsem.0.003689

Islam, M. T., Tabrez, S., Jabir, N. R., Ali, M., Kamal, M. A., da Silva Araujo, L., De Oliveira Santos, J. V., Da Mata, A. M. O. F., De Aguiar, R. P. S., & de Carvalho Melo Cavalcante, A. A. (2018). An Insight into the Therapeutic Potential of Major Coffee Components. *Current Drug Metabolism, 19*(6), 544-556. https://doi.org/10.2174/1389200219666180302154551

Jan-Roblero, J., Cruz-Maya, J. A., & Cancino-Diaz, J. C. (2024). Novel Molecular Techniques for Identifying Agricultural Microorganisms. *Agriculture, 14*(7), 987. https://doi.org/10.3390/agriculture14070987

Jasso-Arreola, Y., Ibarra, J. A., Rosas-Cárdenas, F. d. F., & Estrada-de los Santos, P. (2025). Beneficial Effects of ACC Deaminase-Producing Rhizobacteria on the Drought Stress Resistance of *Coffea arabica* L. *Plants, 14*(7), 1084. https://doi.org/10.3390/plants14071084

Jiang, H., Chen, Y., Hu, Y., Wang, Z., & Lu, X. (2021). Soil bacterial communities and diversity in alpine grasslands on the Tibetan Plateau based on 16S rRNA gene sequencing. *Frontiers in Ecology and Evolution, 9*, 630722. https://doi.org/10.3389/fevo.2021.630722

Jones, F. P., Clark, I. M., King, R., Shaw, L. J., Woodward, M. J., & Hirsch, P. R. (2016). Novel European free-living, non-diazotrophic Bradyrhizobium isolates from contrasting soils that lack nodulation and nitrogen fixation genes - A genome comparison. *Scientific Reports, 6*, 25858. https://doi.org/10.1038/srep25858

Jurburg, S. D., Shek, K. L., & mcguire, K. (2020). Soil microbial composition varies in response to coffee agroecosystem management. *FEMS Microbiology Ecology, 96*(9). https://doi.org/10.1093/femsec/fiaa164

Kalam, S., Basu, A., Ahmad, I., Sayyed, R. Z., El-Enshasy, H. A., Dailin, D. J., & Suriani, N. L. (2020). Recent Understanding of Soil Acidobacteria and Their Ecological Significance: A Critical Review. *Frontiers in Microbiology,* 11. https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.580024

Kartika, E., Duaja, M. D. & Gusniwati, G. (2019). Diversity of Arbuscular Mycorrhizal Fungi from Liberica Tungkal Jambi Coffee Plant Rhizosphere on Peatland. *IOP Conference Series: Earth and Environmen-*

tal Science, 391(1), 012058. https://doi.org/10.1088/1755-1315/391/1/012058

Kejela, T., Thakkar, V. R., & Thakor, P. (2016). *Bacillus* species (BT42) isolated from *Coffea arabica* L. rhizosphere antagonizes *Colletotrichum gloeosporioides* and *Fusarium oxysporum* and also exhibits multiple plant growth promoting activity. *BMC Microbiology*, *16*, 277. https://doi.org/10.1186/s12866-016-0897-y

Khalil, Z. G., Salim, A. A., Vuong, D., Crombie, A., Lacey, E., Blumenthal, A., & Capon, R. J. (2017). Amycolatopsins A-C: Antimycobacterial glycosylated polyketide macrolides from the Australian soil Amycolatopsis sp. MST-108494. *Journal of Antibiotics, 70*(12), 1097-1103. https://doi.org/10.1038/ja.2017.119

Kim, D. U., Lee, H., Kim, H., Kim, S. G., & Ka, J. O. (2016). *Dongia soli* sp. Nov., isolated from soil from Dokdo, Korea. *International Journal of General and Molecular Microbiology, 109*(10), 1397-1402. https://doi.org/10.1007/s10482-016-0738-x

Kim, D. Y., Han, J. W., Lee, J. W., Kim, B., Kim, Y. S., Kim, H. T., Choi, G. J., & Kim, H. (2023). Biocontrol potential of *Chitinophaga flava* HK235 producing antifungal-related peptide chitinocin. *Frontiers in Microbiology, 14*, 1170673. https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1170673

Knežević, M., Berić, T., Buntić, A., Jovković, M., Avdović, M., Stanković, S., Delić, D., & Stajković-Srbinović, O. (2022). Native Mesorhizobium strains improve yield and nutrient composition of the common bird's-foot trefoil grown in an acid soil. *Rhizosphere, 21*, 100487. https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2022.100487

Kostka, J. E., Green, S. J., Rishishwar, L., Prakash, O., Katz, L. S., Mariño-Ramírez, L., King Jordan, I., Munk, C., Ivanova, N., Mikhailova, N., Watson, D. B., Brown, S. D., Palumbo, A. V., & Brooks, S. C. (2012). Genome sequences for six *Rhodanobacter* strains, isolated from soils and the terrestrial subsurface, with variable denitrification capabilities. *Journal of Bacteriology*, *194*(16), 4461-4462). https://doi.org/10.1128/JB.00871-12

Kruczyńska, A., Kuźniar, A., Podlewski, J., Słomczewski, A., Grządziel, J., Marzec-Grządziel, A., Gałązka, A., & Wolińska, A. (2023). Bacteroidota structure in the face of varying agricultural practices as an important indicator of soil quality – a culture independent approach. *Agriculture, Ecosystems and Environment, 342,* 108252. https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.108252

Kutos, S., Bennett, R., Rao, M. V., Fleischer, R. C., Rice, R., & Muletz-Wolz, C. (2024). Farm management and shade tree species influence coffee soil microbiomes in Central and South America. *Applied Soil Ecology*, *202*, 105571. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.105571

Li, C., Hu, H. W., Chen, Q. L., Chen, D., & He, J. Z. (2019). Comammox *Nitrospira* play an active role in nitrification of agricultural soils amended with nitrogen fertilizers. *Soil Biology and Biochemistry, 138,* 107609. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.107609

Li, J., Wang, C., Liang, W., & Liu, S. (2021). Rhizosphere Microbiome: The Emerging Barrier in Plant-Pathogen Interactions. *Frontiers in Microbiology, 12*, 772420. https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.772420

Liao, H.-L. (2021). *The plant-growth-promoting fungus, Mortierella elongata: Its biology, ecological distribution, and activities promoting plant growth*. University of Florida Institute of Food and Agricultural. https://ask.ifas.ufl.edu/publication/SS679

Ling, N., Wang, T., & Kuzyakov, Y. (2022). Rhizosphere bacteriome structure and functions. *Nature Communications, 13*, 836. https://doi.org/10.1038/s41467-022-28448-9

Lu, X., Taylor, A. E., Myrold, D. D., & Neufeld, J. D. (2020). Expanding perspectives of soil nitrification to include ammonia-oxidizing archaea and comammox bacteria. *Soil Science Society of America Journal*, *84*, 287-302. https://doi.org/10.1002/saj2.20029

Lv, Y. Y., Gao, Z. H., Xia, F., Chen, M. H., & Qiu, L. H. (2017). *Puia dinghuensis* gen. Nov., sp. Nov., isolated from monsoon evergreen broad-leaved forest soil. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 67*(11), 4639-4645. https://doi.org/10.1099/ijsem.0.002346

Ma, Y., Wang, J., Liu, Y., Wang, X., Zhang, B., Zhang, W., Chen, T., Liu, G., Xue, L., & Cui, X. (2023). *Nocardioides*: "Specialists" for Hard-to-Degrade Pollutants in the Environment. *Molecules, 28(*21), 7433. https://doi.org/10.3390/molecules2821 7433

Menéndez, E., Pérez-Yépez, J., Hernández, M., Rodríguez-Pérez, A., Velázquez, E., & León-Barrios, M. (2020). Plant growth promotion abilities of phylogenetically diverse *Mesorhizobium* strains: Effect in the root colonization and development of tomato seedlings. *Microorganisms, 8*(3), 412. https://doi.org/10.3390/microorganisms8030412

Mertz, F. P., & Yao, R. C. (1993). Amycolatopsis alba sp. Nov., Isolated from Soil. In *International Journal of Systematic Bacteriology, 43*(4), 715-720. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/8240953/

Mng'ong'o, M. E., Ojija, F., & Aloo, B. N. (2023). The role of Rhizobia toward food production, food and soil security through microbial agro-input utilization in developing countries. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering, 8*, 100404. https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100404

Moher D., Liberati A., Tetzlaff J., Altman D. G., The PRISMA Group (2009). Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement. *PLoS Med 6*(7): e1000097. https://doi.org/10.1371/journal.pmed.100009

Moreira, S. D., França, A. C., Rocha, W. W., Tibães, E. S. R., & Neiva Júnior, E. (2018). Inoculation with mycorrhizal fungi on the growth and tolerance to water deficit of coffee plants. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 22*(11), 747-752. https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n11p747-752

Mulatu, A., Megersa, N., Abena, T., Kanagarajan, S., Liu, Q., Tenkegna, T. A., & Vetukuri, R. R. (2022). Biodiversity of the Genus Trichoderma in the Rhizosphere of Coffee (*Coffea arabica*) Plants in Ethiopia and Their Potential Use in Biocontrol of Coffee Wilt Disease. *Crops, 2*(2), 120-141. https://doi.org/10.3390/crops2020010

Mulaw, T. B., Kubicek, C. P., & Druzhinina, I. S. (2010). The rhizosphere of *Coffea arabica* in its native highland forests of Ethiopia provides a niche for a distinguished diversity of *Trichoderma*. *Diversity, 2*(4), 527. https://doi.org/10.3390/d2040527

Muleta, A., Tesfaye, K., Haile Selassie, T. H., Cook, D. R., & Assefa, F. (2021). Phosphate solubilization and multiple plant growth promoting properties of *Mesorhizobium* species nodulating chickpea from acidic soils of Ethiopia. *Archives of Microbiology, 203*(5), 2129-2137. https://doi.org/10.1007/s00203-021-02189-7

Muok, A. R., Claessen, D., & Briegel, A. (2021). Microbial hitchhiking: how Streptomyces spores are transported by motile soil bacteria. *The ISME Journal, 15*(9), 2591-2600. https://doi.org/10.1038/s41396-021-00952-8

Nakayasu, M., Takamatsu, K., Kanai, K., Masuda, S., Yamazaki, S., Aoki, Y., Shibata, A., Suda, W., Shirasu, K., Yazaki, K., & Sugiyama, A. (2023). Tomato root-associated *Sphingobium* harbors genes for catabolizing toxic steroidal glycoalkaloids. *Mbio, 14*, e00599-23. https://doi.org/10.1128/MBIO.00599-23

Nastiti, W., & Prayogo, C. (2020). Pemberian biochar diperkaya Trichoderma dengan penambahan amonium nitrat untuk meningkatkan pertumbuhan bibit kopi Arabika. Jurnal tanah dan sumberdaya lahan Учредители: *Brawijaya University, 7*(2), 351-357. https://doi.org/10.21776/ub.jtsl.2020.007. 2.20

Navarro, G. V. D., Quirong, D. D., Maghanoy, G. A., & Cortes, A. D. (2023). Characterization and identification of rhizobacteria associated with Liberica and Robusta coffee rhizosphere. *Technology in Horticulture, 3*, 24. https://doi.org/10.48130/tih-2023-0024

Ochoa-Henriquez, V. H., Faggioli, V., Gómez-Godínez, L. J., Rivarola, M., & Cristancho, M. (2024). Colombian coffee (*Coffea arabica* L.) Plantations: a taxonomic and functional survey of soil fungi. *Frontiers in Sustainable Food Systems, 8*, 1345383. https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1345383

Olal, S., Bitalo, D. N., Olango, N. D., Mulindwa, J., Ochwo, S., Opiyo, S. O., Arinaitwe, G., & Ogwok, E. (2019). *De novo* genome sequence of a *Fusarium xylarioides* race pathogenic to Robusta coffee (*Coffea canephora*) in Uganda. *Microbiology Resource Announcements, 8*(31), 10.1128. https://doi.org/10.1128/mra.00520-19

Oliveira, C., Shakiba, E., North, D., McGraw, M., Ballard, E., Barrett-D'Amico, M., Glazko, G., & Rahmatallah, Y. (2022). 16S rRNA gene-based metagenomic analysis of rhizosphere soil bacteria

in Arkansas rice crop fields. *Agronomy, 12*(1), 222. https://doi.org/10.3390/agronomy12010222

Oliveira, M. C. O., Alves, A., Fidalgo, C., de Freitas, J. G. R., & Pinheiro de Carvalho, M. A. A. (2024). Variations in the structure and function of the soil fungal communities in the traditional cropping systems from Madeira Island. *Frontiers in Microbiology, 15*, 1426957. https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1426957

Oliveira-Longatti, S. M. De, Marra, L. M., & Moreira, F. M. D. S. (2013). Evaluation of plant growth-promoting traits of Burkholderia and Rhizobium strains isolated from Amazon soils for their co-inoculation in common bean. *African Journal of Microbiology Research, 7*(11), 948-959. https://doi.org/10.5897/AJMR12.1055

Oshkin, I. Y., Kulichevskaya, I. S., Rijpstra, W. I. C., Damste, J. S. S., Rakitin, A. L., Ravin, N. V., & Dedysh, S. N. (2019). *Granulicella sibirica* sp. Nov., a psychrotolerant acidobacterium isolated from an organic soil layer in forested tundra, West Siberia. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 69*(4), 1195-1201. https://doi.org/10.1099/ijsem.0.003290

Pantigoso, H. A., Newberger, D., & Vivanco, J. M. (2022). The rhizosphere microbiome: Plant–microbial interactions for resource acquisition. *Journal of Applied Microbiology, 133*(5), 2864-2876. https://doi.org/10.1111/jam.15686

Patay, É. B., Bencsik, T., & Papp, N. (2016). Phytochemical overview and medicinal importance of *Coffea* species from the past until now. *Asian Pacific Journal of Tropical Medicine, 9*(12), 1127-1135. https://doi.org/10.1016/j.apjtm.2016.11.008

Peterson, S. W., Vega, F. E., Posada, F., & Nagai, C. (2005). *Penicillium coffeae*, a new endophytic species isolated from a coffee plant and its phylogenetic relationship to *P. fellutanum*, *P. thiersii* and *P. brocae* based on parsimony analysis of multilocus DNA sequences. *Mycologia, 97*(3), 659-666. https://doi.org/10.3852/mycologia.97.3.659

Petters, S., Groß, V., Söllinger, A., Pichler, M., Reinhard, A., Bengtsson, M. M., & Urich, T. (2021). The soil microbial food web revisited: Predatory myxobacteria as keystone taxa? The *ISME Journal, 15*(9), 2665-2675. https://doi.org/10.1038/s41396-021-00958-2

Pino, A. F. S., Espinosa, Z. Y. D., & Cabrera, E. V. R. (2023). Characterization of the rhizosphere bacterial microbiome and coffee bean fermentation in the Castillo-Tambo and Bourbon varieties in the Popayán-Colombia Plateau. *BMC Plant Biology, 23*, 217. https://doi.org/10.1186/s12870-023-04182-2

Purwaningsih, S., Agustiyani, D., & Antonius, S. (2021). Diversity, activity, and effectiveness of Rhizobium bacteria as plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) isolated from Dieng, central Java (Vol. 13, Issue 1). https://doi.org/10.3390/plants10040779

Rao, M. V., Rice, R. A., Fleischer, R. C., & Muletz-Wolz, C. R. (2020). Soil fungal communities differ between shaded and

sun-intensive coffee plantations in El Salvador. *PLoS ONE, 15*(4), e0231875. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0231875

Razafinarivo, N. J., Guyot, R., Davis, A. P., Couturon, E., Hamon, S., Crouzillat, D., Rigoreau, M., Dubreuil-Tranchant, C., Poncet, V., De Kochko, A., Rakotomalala, J. J., & Hamon, P. (2013). Genetic structure and diversity of coffee (Coffea) across Africa and the Indian Ocean islands revealed using microsatellites. *Annals of Botany, 111*(2), 229-248. https://doi.org/10.1093/aob/mcs283

Renzi, S., Nenciarini, S., & Cavalieri, D. (2023). Yeast metagenomics: analytical challenges in the analysis of the eukaryotic microbiome. *Microbiome Research Reports, 3*(2). https://doi.org/10.20517/mrr.2023.27

Richter, D. D., Oh, N.-H., Fimmen, R., & Jackson, J. (2007). The Rhizosphere and Soil Formation. The Rhizosphere (179-200). Elsevier Inc. https://doi.org/10.1016/B978-012088775-0/50010-0

Sah, S., & Singh, R. (2016). Phylogenetical coherence of *Pseudomonas* in unexplored soils of Himalayan region. *3 Biotech,* 6(2), 170. https://doi.org/10.1007/s13205-016-0493-8

Sattler, M. C., de Oliveira, S. C., Mendonça, M. A. C., & Clarindo, W. R. (2022). Coffea cytogenetics: from the first karyotypes to the meeting with genomics. *Planta, 255*(6), 112. https://doi.org/10.1007/s00425-022-03898-z

Sasan, R. K., & Bidochka, M. J. (2012). The insect-pathogenic fungus *Metarhizium robertsii* (Clavicipitaceae) is also an endophyte that stimulates plant root development. *American Journal of Botany, 99*(1), 101-107. https://doi.org/10.3732/ajb.1100136

Seipke, R. F., Kaltenpoth, M., & Hutchings, M. I. (2012). *Streptomyces* as symbionts: an emerging and widespread theme? *FEMS Microbiology Reviews, 36*(4), 862-876. https://doi.org/10.1111/j.1574-6976.2011.00313.x

Shah, M. A. (2014). Mycorrhizas: An Overview. In Mycorrhizas: Novel Dimensions in the Changing World (pp. 5-12). https://doi.org/10.1007/978-81-322-1865-4_4

Sharma, S., Kumar, S., Khajuria, A., Ohri, P., Kaur, R., & Kaur, R. (2020). Biocontrol potential of chitinases produced by newly isolated *Chitinophaga* sp. S167. *World Journal of Microbiology and Biotechnology, 36*(6), 90. https://doi.org/10.1007/s11274-020-02864-9

Shayanthan, A., Ordoñez, P. A. C., & Oresnik, I. J. (2022). The Role of Synthetic Microbial Communities (SynCom) in Sustainable Agriculture. *Frontiers in Agronomy, 4*, 896307. https://doi.org/10.3389/fagro.2022.896307

Silva, E. C., Gusmão, A. K. H., Barros, M. de, Azevedo A. da S., Guimarães, E. R., & Castro Junior, L. G. (2019). Governança privada e sustentabilidade na indústria do café. *Agroalimentaria, 25*(48), 35-51. https://www.redalyc.org/journal/1992/199262942003/html/

Silveira, A. P. D., Tristão, F. S. M., Fernandes, A. O., Andrade, S. A. L., & Cipriano, M. A. P. (2023). Arbuscular mycorrhizal fungi inoculation for coffee seedling production with commercial and conventional substrates. *Bragantia*, 82, e20220161. https://doi.org/10.1590/1678-4499.20220161

Singh, A., Kumari, R., Yadav, A. N., Mishra, S., Sachan, A., & Sachan, S. G. (2020). Tiny microbes, big yields: Microorganisms for enhancing food crop production for sustainable development. *New and Future Developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering*, 1-15. Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820526-6.00001-4

Solis, A., Delgado, Z., & Ramos, E. (2023). Characterization of the Rhizosphere Bacterial Microbiome and Coffee Bean Fermentation in the Castillo-Tambo and Bourbon Varieties in the Popayán-Colombia Plateau. *BMC Plant Biology, 23*, 217. https://doi.org/10.1186/s12870-023-04182-2

Sopiana, E., Tahir, M., & Sudirman, A. (2018). Respons Viabilitas Benih Kopi Arabica (Coffea arabica) terhadap Pelumuran Jamur Trichoderma viride di Pre-nursery. *Jurnal Agro Industri Perkebunan, 6*(1), 9-18. https://doi.org/10.25181/jaip.v6i1.656

Stopnisek, N., Zuhlke, D., Carlier, A., Barberan, A., Fierer, N., Becher, D., Riedel, K., Eberl, L., & Weisskopf, L. (2016). Molecular mechanisms underlying the close association between soil *Burkholderia* and fungi. *ISME Journal, 10*(1), 253-264. https://doi.org/10.1038/ismej.2015.73

Su, Y., He, Z., Yang, Y., Jia, S., Yu, M., Chen, X., & Shen, A. (2020). Linking soil microbial community dynamics to straw-carbon distribution in soil organic carbon. *Scientific Reports, 10*, 5526. https://doi.org/10.1038/s41598-020-62198-2

Sugawara, M., Shah, G. R., Sadowsky, M. J., Paliy, O., Speck, J., Vail, A. W., & Gyaneshwar, P. (2011). Expression and Functional Roles of Bradyrhizobium japonicum Genes Involved in the Utilization of Inorganic and Organic Sulfur Compounds in Free-Living and Symbiotic Conditions. / 451 MPMI, 24(4), 451-457. https://doi.org/10.1094/MPMI-08-10-0184

Suharjono, & Yuliatin, E. (2022). Bacteria communities of coffee plant rhizosphere and their potency as plant growth promoting. *Biodiversitas, 23*(11), 5822-5834. https://doi.org/10.13057/biodiv/d231136

Sun, Y., Yan, L., Zhang, A., Yang, J., Zhao, Q., Lin, X., Zhang, Z., Huang, L., Wang, X., & Wang, X. (2024). Effects of grafting on the structure and function of coffee rhizosphere microbiome. *Agriculture, 14*(10), 1854. https://doi.org/10.3390/agriculture14101854

Sutariati, G. A. K., Rahni, N. M., Madiki, A., Mudi, L., Guyasa, I. M., & Zahrima. (2020). Characterization of endophytic-rhizobacteria from areca nut rhizosphere to dissolve phosphates, nitrogen fixation of IAA hormone synthesis. *Pakistan Journal of Biological Sciences, 23*(3), 240-247. https://doi.org/10.3923/pjbs.2020.240.247

Tapaça, I. D. P. E., Obieze, C. C., Pereira, G. V. D. M., Fangueiro, D., Coutinho, J., Fraga, I., Partelli, F. L., Ramalho, J. C., Marques, I., & Ribeiro-Barros, A. I. (2024). Irradiance level and elevation shape the soil microbiome communities of *Coffea arabica* L. *Environmental Microbiome, 19*, 75. https://doi.org/10.1186/s40793-024-00619-9

Teshome, B., Wassie, M., & Abatneh, E. (2017). Isolation, screening and biochemical characterization of phosphate-solubilizing rhizobacteria associated with *Coffea arabica* L. *Journal of Fertilizers & Pesticides*, *8*(3), 188. https://doi.org/10.4172/2471-2728.1000188

Tran, D. M. (2022). Rhizosphere microbiome dataset of Robusta coffee (*Coffea canephora* L.) grown in the Central Highlands, Vietnam, based on 16S rRNA metagenomics analysis. *Data in Brief*, *42*, 108106. https://doi.org/10.1016/j.dib.2022.108106

Vaninsberghe, D., Maas, K. R., Cardenas, E., Strachan, C. R., Hallam, S. J., & Mohn, W. W. (2015). Non-symbiotic *Bradyrhizobium* ecotypes dominate North American forest soils. *The ISME Journal, 9*(11), 2435-2441. https://doi.org/10.1038/ismej.2015.54

Veloso, T. G. R., da Silva, M. d. C. S., Moreira, T. R., da Luz, J. M. R., Moreli, A. P., Kasuya, M. C. M., & Pereira, L. L. (2023). Microbiomes associated with Coffea arabica and *Coffea canephora* in four different floristic domains of Brazil. *Scientific Reports, 13*, 18477. https://doi.org/10.1038/s41598-023-45465-w

Vega, F. E., Posada, F., Peterson, S. W., Gianfagna, T. J., & Chaves, F. (2006). *Penicillium* species endophytic in coffee plants and ochratoxin A production. *Mycologia, 98*(1), 31-42. https://doi.org/10.3852/mycologia.98.1.31

Vila, T., Nazir, R., Rozental, S., dos Santos, G. M. P., Calixto, R. O. R., Barreto-Bergter, E., Wick, L. Y., & van Elsas, J. D. (2016). The role of hydrophobicity and surface receptors at hyphae of *Lyophyllum* sp. Strain Karsten in the interaction with *Burkholderia terrae* BS001 - Implications for interactions in soil. *Frontiers in Microbiology, 7*, 1689. https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.01689

Villamil, M. B., Kim, N., Riggins, C. W., Zabaloy, M. C., Allegrini, M., & Rodríguez-Zas, S. L. (2021). Microbial Signatures in Fertile Soils Under Long-Term N Management. *Frontiers in Soil Science, 1,* 765901. https://doi.org/10.3389/fsoil.2021.765901

Walsh, C. M., Gebert, M. J., Delgado-Baquerizo, M., Maestre, F. T., & Fierer, N. (2019). A global survey of mycobacterial diversity in soil. *Applied and Environmental Microbiology, 85*, e01180-19. https://doi.org/10.1128/AEM.01180-19

Wang, M., Xue, J., Ma, J., Feng, X., Ying, H., & Xu, H. (2020). *Streptomyces lydicus* M01 Regulates Soil Microbial Community and Alleviates Foliar Disease Caused by *Alternaria alternata* on Cucumbers. *Frontiers in Microbiology, 11*, 942. https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.00942

Wang, R., An, X., Lv, Y., Asad Ali Khan, R., Xue, M., Chen, J., & Liu, T. (2023). *Tri-*

choderma asperellum GD040 upregulates defense-related genes and reduces lesion size in *Coffea canephora* leaves inoculated with *Colletotrichum cairnsense*. *Biological Control, 181*, 105213. https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2023.105213

Weon, H. Y., Anandham, R., Kim, B. Y., Hong, S. B., Jeon, Y. A., & Kwon, S. W. (2009). Dyella soli sp. Nov. And Dyella terrae sp. Nov., isolated from soil. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 59*(7), 1685-1690. https://doi.org/10.1099/ijs.0.004838-0

Weon, H. Y., Kim, B. Y., Yoo, S. H., Lee, S. Y., Kwon, S. W., Go, S. J., & Stackebrandt, E. (2006). *Niastella koreensis* gen. Nov., sp. Nov. and *Niastella yeongjuensis* sp. Nov., novel members of the phylum *Bacteroidetes*, isolated from soil cultivated with Korean ginseng. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 56*(8), 1777-1782. https://doi.org/10.1099/ijs.0.64242-0

Wu, Y., Zhao, X., Wang, Z., Li, X., Zhang, X., Xie, C., Du, H., Jiang, K., Qu, P., & Zhang, C. (2025). The role of coffee microbiomes in pathogen resistance across varieties and ecological niches. *Microorganisms*, *13*(8), 1909. https://doi.org/10.3390/microorganisms13081909

Xin, X., Liu, S., Qin, J., Ye, Z., Liu, W., Fang, S., & Yang, J. (2021). Performances of simultaneous enhanced removal of nitrogen and phosphorus via biological aerated filter with biochar as fillers under low dissolved oxygen for digested swine wastewater treatment. *Bioprocess and Biosystems Engineering, 44*, 1741-1753. https://doi.org/10.1007/s00449-021-02557-z

Yabe, S., Sakai, Y., & Yokota, A. (2016). *Thermosporothrix narukonensis* sp. Nov., belonging to the class *Ktedonobacteria*, isolated from fallen leaves on geothermal soil, and emended description of the genus *Thermosporothrix*. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 66*(6), 2152-2157. https://doi.org/10.1099/ijsem.0.001004

Yoon, J.-H., & Park, Y.-H. (2006). The Genus Nocardioides. In The Prokaryotes (1099-1113). https://doi.org/10.1007/0-387-30743-5_44

Yusuf, M., Fernandes, A. A. R., Kurniawan, S., & Arisoesilaningsih, E. (2021). Spatial variation of soil bacteria communities and its alpha diversity as a potential bioindicator of land degradation. *Journal of Degraded and Mining Lands Management, 8*(4), 2847-2860. https://doi.org/10.15243/jdmlm.2021.084.2847

Zhang, H., Zhang, H., Qin, X., Wang, X., Wang, Y., Bin, Y., Xie, X., Zheng, F., & Luo, H. (2021). Biodegradation of Deoxynivalenol by *Nocardioides* sp. ZHH-013: 3-*keto*-Deoxynivalenol and 3-*epi*-Deoxynivalenol as Intermediate Products. *Frontiers in Microbiology, 12*, 658421. https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.658421

Zhang, J., Wang, N., Li, S., Wang, J., Feng, Y., Wang, E., Li, Y., Yang, T., & Chen, W. (2023a). The Effect of Different Rhizobial Symbionts on the Composition and Diversity of Rhizosphere Microorganisms of Chickpea in Different Soils. *Plants,*

12(19), 3421. https://doi.org/10.3390/plants12193421

Zhang, M., Liang, G., Ren, S., Li, L., Li, C., Li, Y., Yu, X., Yin, Y., Liu, T., & Liu, X. (2023b). Responses of soil microbial community structure, potential ecological functions, and soil physicochemical properties to different cultivation patterns in cucumber. *Geoderma, 429*, 116237. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116237

Zhao, Q., Xiong, W., Xing, Y., Sun, Y., Lin, X., & Dong, Y. (2018). Long-Term Coffee Monoculture Alters Soil Chemical Properties and Microbial Communities. *Scientific Reports, 8*, 6116. https://doi.org/10.1038/s41598-018-24537-2

Zhao, S., Zhang, A., Zhao, Q., Dong, Y., Su, L., Sun, Y., Zhu, F., Hua, D., & Xiong, W. (2023). The impact of main *Areca catechu* root exudates on soil microbial community structure and function in coffee plantation soils. *Frontiers in Microbiology, 14*, 1257164. https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1257164

Zhao, Y., Yao, Y., Xu, H., Xie, Z., Guo, J., Qi, Z., & Jiang, H. (2022). Soil metabolomics and bacterial functional traits revealed the responses of rhizosphere soil bacterial community to long-term continuous cropping of Tibetan barley. *Peerj, 10*, e13254. https://doi.org/10.7717/peerj.13254

Zhou, L., Li, H., Zhang, Y., Han, S., & Xu, H. (2016). *Sphingomonas* from petroleum-contaminated soils in Shenfu, China and their PAHs degradation abilities. *Brazilian Journal of Microbiology, 47*(2), 271-278. https://doi.org/10.1016/j.bjm.2016.01.001

Conflicto de intereses
Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Licencia de Creative Commons
Revista de Investigación Agraria y Ambiental is licensed under a Creative Commons Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual 4.0 Internacional License.

Received: July 10, 2025
Accepted: November 30, 2025
DOI: 10.22490/21456453.10040

PHYSIOLOGICAL PARAMETERS OF LATEX IN THE RRIM 600 AND FX 3864 RUBBER CLONES IN COLOMBIA

PARÁMETROS FISIOLÓGICOS DEL LÁTEX EN LOS CLONES RRIM 600 Y FX 3864 EN COLOMBIA

Franck Rivano[1]

Juan David Hernández Arredondo[2]

Jorge Humberto Argüelles Cárdenas[3]

Maribel Tarazona Yanes[4]

David Ricardo Hernández Angarita[5]

Régis Lacote[6]

Citación: Rivano, F., Hernández Arredondo, J. D., Argüelles Cárdenas, J. H., Tarazona Yanes, M., Hernández Angarita, D. R., & Lacote, R. (2026). Physiological parameters of latex in the RRIM 600 and FX 3864 rubber clones in Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental, 17*(2), 121-138. https://doi.org/10.22490/21456453.10040

[1] PhD in Plant Pathology, French Agricultural Research Centre for International Development (CIRAD), Montpellier, France. franckrivano@gmail.com

[2] Master's degree in Agricultural Sciences, Colombian Agricultural Research Corporation (AGROSAVIA), El Nus Research Center, Antioquia, Colombia. jdhernandez@agrosavia.co

[3] Master's degree in Statistics, Colombian Agricultural Research Corporation (AGROSAVIA), La Libertad Research Center, Villavicencio, Colombia. jorargu@yahoo.com.mx

[4] Bachelor's degree in Agricultural Production, Colombian Agricultural Research Corporation (AGROSAVIA), La Libertad Research Center, Villavicencio, Colombia. mtarazona@agrosavia.co

[5] Agronomist, Colombian Agricultural Research Corporation (AGROSAVIA), La Libertad Research Center, Villavicencio, Colombia. drhernandez@agrosavia.co

[6] PhD in Plant Ecophysiology, French Agricultural Research Centre for International Development (CIRAD), Montpellier, France. regis.lacote@cirad.fr

ABSTRACT

Contextualization: Studying the metabolic role of certain compounds in the latex produced by *Hevea brasiliensis* trees can help adjust harvesting strategies for each clone under specific environmental conditions.

Knowledge gap: In Colombia, little is known about the metabolic response of the RRIM 600 and FX 3864 clones to hormonal stimulation. This limits the development of appropriate management programs and increases the risk of overexploitation or underutilization of the clones' productive potential.

Purpose: This study aimed to characterize the metabolic status of latex from the RRIM 600 and FX 3864 clones using the Latex Diagnosis method in order to adjust harvesting practices according to the physiology of each clone.

Methodology: The study was conducted between 2021 and 2022 on 12 farms in the department of Meta, Colombia, using a randomized complete block design with two treatments (clones) and four replications per farm. Four physiological latex parameters were evaluated using spectrophotometric analyses: sucrose content, inorganic phosphorus content, thiol content, and total solids content. Data were analyzed using a generalized linear mixed model to identify significant effects of clone, farm, and year.

Results and conclusions: RRIM 600 showed higher levels of inorganic phosphorus and total solids content, suggesting greater metabolic activity. FX 3864 had higher levels of sucrose and thiols, indicating slower metabolism, greater antioxidant capacity, and greater energy reserves. These physiological differences highlight the need to adjust stimulation intensity according to the metabolic characteristics of each clone. Latex Diagnosis is a key technical tool for improving the sustainability and efficiency of rubber cultivation in the region.

Keywords: stimulation, latex, *Hevea brasiliensis*, crop yield.

RESUMEN

Contextualización: El estudio del papel metabólico de algunos compuestos presentes en el látex producido por los árboles de *Hevea brasiliensis* permite ajustar las estrategias de explotación de cada clon a condiciones ambientales específicas.

Vacío de conocimiento: En Colombia, se desconoce la respuesta metabólica de los clones RRIM 600 y FX 3864 a la estimulación hormonal. Esta falta de conocimiento dificulta el desarrollo de programas de manejo adecuados y aumenta el riesgo de sobreexplotación o subutilización del potencial productivo de estos clones.

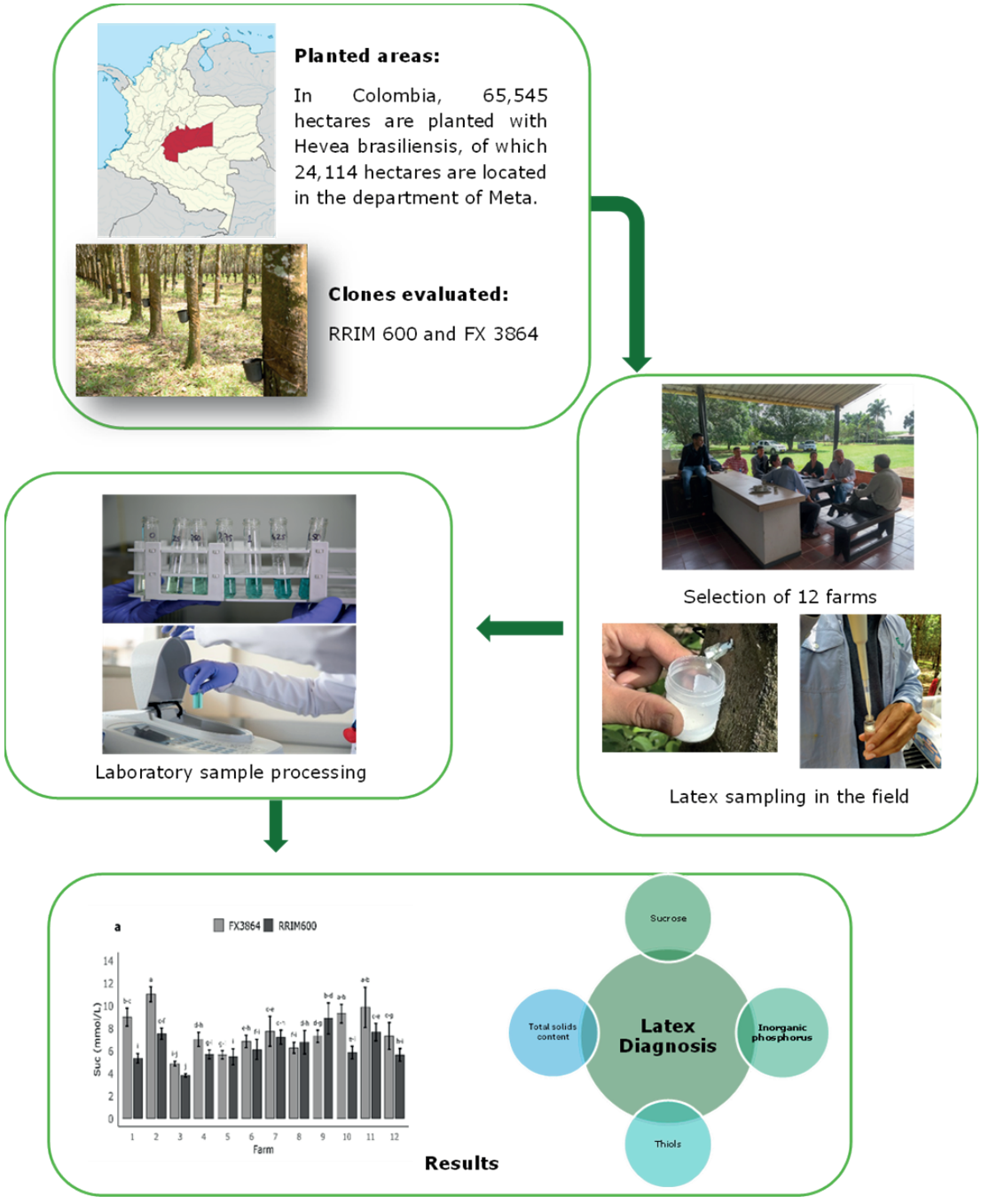
Propósito: El objetivo fue caracterizar el estado metabólico del látex de los clones RRIM 600 y FX 3864 mediante el método de Diagnóstico Látex, con el fin de ajustar las prácticas de explotación de acuerdo con la fisiología de cada clon.

Metodología: El estudio se realizó entre el 2021 y el 2022 en 12 fincas del departamento del Meta, Colombia. Se empleó un diseño de bloques completos al azar con dos tratamientos, correspondientes a los dos clones, y cuatro repeticiones por finca. Se evaluaron cuatro parámetros fisiológicos del látex mediante análisis espectrofotométricos: sacarosa, fósforo inorgánico, tioles y contenido de sólidos totales. Los datos se analizaron mediante un modelo lineal generalizado mixto para determinar los efectos del clon, la finca y el año.

Resultados y conclusiones: El clon RRIM 600 exhibió mayores niveles de fósforo inorgánico y contenido de sólidos totales, lo que sugiere una mayor actividad metabólica. Por su parte, FX 3864 presentó mayores niveles de sacarosa y tioles, indicativos de un metabolismo más lento, una mayor capacidad antioxidante y mayores reservas energéticas. Estas diferencias fisiológicas resaltan la necesidad de ajustar la intensidad de la estimulación a las características metabólicas de cada clon. El Diagnóstico Látex constituye una herramienta técnica clave para mejorar la sostenibilidad y la eficiencia del cultivo de caucho en la región.

Palabras clave: estimulación, látex, *Hevea brasiliensis*, rendimiento del cultivo.

GRAPHICAL ABSTRACT



Process diagram of the Latex Diagnosis method applied to the FX 3864 and RRIM 600 clones on 12 farms in the department of Meta, Colombia.

Source: Authors.

1 INTRODUCTION

Globally, natural rubber plantations cover approximately 14 million hectares, with production reaching approximately 13.7 million metric tons in 2019 (Pinizzotto, 2021). In Colombia, approximately 65,545 hectares are planted across five production zones. The Orinoquia region accounts for 33,069 hectares, equivalent to 53.75% of the national planted area, and production reached 12,102 metric tons in 2020 (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2021).

One viable strategy for increasing crop yield is hormonal stimulation with 2-chloroethylphosphonic acid (ethephon), which can significantly boost plantation productivity (Cruz et al., 2017; Lacote et al., 2010; Rojas Molina et al., 2017). However, excessive stimulant use must be avoided, as it can cause tapping panel dryness (TPD), or dry cutting, a condition characterized by physiological exhaustion of the trees that can lead to drying of the laticiferous system (Herlinawati et al., 2022; Jacob et al., 1989; Obouayeba et al., 2021).

Therefore, the stimulation frequency must be adjusted to improve yield without compromising tree health (Junaidi, Nuringtyas, et al., 2022; Purwaningrum et al., 2019). Latex Diagnosis (LD), a method developed by the Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD), makes it possible to assess tree physiological status and monitor hormonal stimulation intensity (Gohet et al., 2005; Jacob et al., 1998; Junaidi, Clément-Vidal, et al., 2022).

The LD method is based on monitoring four latex variables: sucrose content (Suc), a precursor for rubber biosynthesis; inorganic phosphorus content (Pi), which is associated with cellular energy; thiol content (R-SH), which reflects the activity of reducing agents that protect membranes from oxidizing agents and facilitate latex drainage (Jacob et al., 1989); and total solids content (TSC), an index of the biological activity of laticif erous cells (Jacob et al., 1995). The method also makes it possible to optimize harvesting systems, including tapping frequency and stimulation, based on clonal metabolism, thereby reducing the risk of tapping panel dryness (Gohet et al., 2019; Ismawanto et al., 2024; Putranto et al., 2015; Sterling Cuéllar et al., 2020).

Reference values for the LD parameters of each clone must be determined under the edaphoclimatic conditions of each cultivation site. These values are essential to ensure that stimulation strategies are physiologically appropriate and do not compromise crop yield or tree health. Accordingly, this study aimed to characterize the physiological status of the RRIM 600 and FX 3864 clones using the Latex Diagnosis method in the Colombian Orinoquia. The RRIM 600 and FX 3864 clones were expected to exhibit significant variations in Latex Diagnosis parameters (Suc, Pi, R-SH, and TSC), reflecting differences in their metabolic processes and local harvesting

practices in the Colombian Orinoquia. These variations were expected to influence their response to ethephon stimulation and their productive potential.

2 MATERIALS AND METHODS

The Latex Diagnosis (LD) method was validated under field conditions by AGROSAVIA at the La Libertad Research Center (Meta, Colombia), in collaboration with CIRAD. Its implementation made it possible to identify seasonal variation and establish reference values for LD parameters in the RRIM 600 and FX 3864 clones, thereby confirming its validity under local conditions.

The study was conducted in rubber plantations located between the municipalities of Puerto López and Puerto Gaitán (Meta, Colombia), established on deep, well-drained Oxisols with moderately fine textures, strongly acidic pH, high aluminum saturation, and very low fertility that is difficult to improve (Delgado Huertas et al., 2018; Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC], 2004). The region has a unimodal rainfall pattern, with a rainy season extending from April to mid-December, followed by a dry season from mid-December through March (Gobernación del Departamento del Meta & IGAC, 2004; Gutiérrez-Vanegas et al., 2020).

Fieldwork began in 2021 and focused on the FX 3864 and RRIM 600 clones. Twelve farms were selected, each with more than 20 hectares planted with rubber, including homogeneous plots that had been actively tapped for 3–8 years and received ethephon stimulation (2.5% 2-chloroethylphosphonic acid).

A half-spiral tapping system (S/2) was used at frequencies of d3, d4, or d5, depending on the farm. Tapping was performed six days per week, and ethephon stimulation (2.5%) was applied 8–12 times per year. The trunk was divided into two tapping panels (BO-1 or BO-2), following the international notation described by Vijayakumar et al. (2009) (Annex 1).

Latex samples were collected every two months during the peak production season (June–November) in 2021 and 2022. For each sampling event, latex was collected from 10 trees, yielding 3 mL per sample. Two 1-mL aliquots were separated: one for biochemical analysis of sucrose, inorganic phosphorus (Pi), and thiols, and the other for total solids content (TSC).

Latex samples collected in the field were processed in the laboratory at AGROSAVIA's La Libertad Research Center, following the method developed by CIRAD (International Rubber Research and Development Board, 1995; Jacob et al., 1988; Nguyen et al., 2017; Purwaningrum et al., 2019). During collection, the samples were preserved in a solution containing EDTA (ethylenediaminetetraacetic acid) and 2.5% TCA (trichloroacetic acid). In the laboratory, the coagulum was macerated with a glass rod to extract the serum, which was filtered through Whatman No. 40 filter paper.

For the analysis of R-SH, Pi, and Suc, colorimetric methods with calibration curves were used. Absorbance was measured using a GENESYS 10S UV-Vis spectrophotometer (Thermo Scientific) at wavelengths of 412 nm for thiols, 410 nm for phosphorus, and 627 nm for sucrose.

For thiol determination, 1 mL of Tris aminomethane, 1.5 mL of sample, and 0.05 mL of Ellman's reagent (DTNB) were mixed, vortexed, and allowed to react for 15 min until a yellow color developed. Inorganic phosphorus was determined by mixing 0.5 mL of sample, 1 mL of 2.5% TCA, and 3 mL of molybdate–vanadate reagent and allowing the mixture to react for 10 min until a yellow color developed.

Sucrose content was determined by mixing 0.1 mL of sample, 0.4 mL of 2.5% TCA, and 3 mL of anthrone reagent. After vortexing, the samples were heated in a water bath at 90 °C for 10 min until a dark green-to-blue color developed, after which absorbance was measured. TSC was determined by weighing 1 mL of fresh latex in preweighed glass vials, drying the samples at 70 °C for 24 h (with drying time adjusted according to vial diameter), and calculating the percentage of solids based on the difference between dry and fresh weights.

Data Analysis and Processing

On each farm, homogeneous blocks of each clone were selected based on genetic material, planting year, and agronomic management. Within these blocks, four tasks (replicates) were selected for latex sampling. In each task, 10 trees located along a diagonal were randomly selected. The experimental design used across the 12 selected farms was a randomized complete block design with two treatments (clones) and four replicates (tasks) per clone.

Combined analyses of variance were performed for repeated observations over time (2021 and 2022) to determine the effects of clone, farm, and evaluation year on the LD variables sucrose content (Suc), inorganic phosphorus content (Pi), thiol content (R-SH), and total solids content (TSC). These analyses were complemented by Tukey's multiple-comparison tests ($\alpha = .05$) using a generalized linear mixed model fitted with the GLIMMIX procedure in SAS Enterprise Guide 8.3 (version 8.3.0.103). The study included 12 farms, two clones, and two evaluation years; the blocks consisted of four tasks per clone within each farm.

The statistical model was expressed as follows:

$$Yijkl = \mu + Fi + Bj(Fi) + Ck + (F * C)ik + (T)l + (F * T)il + (C * T)kl + (F * C * T)ikl + (F * B * C)ijk \quad (1)$$

In this model, Y_{ijkl} denotes the observed value of the response variable, μ denotes the grand mean, F_i represents the effect of the ith farm or location, $B_j(F_i)$ represents the random effect of the block (task) within the farm, C_k represents the effect of the kth clone, $(F \times C)_{ik}$ represents the farm × clone interaction, $(T)_l$ represents the effect of the

lth time point, $(F \times T)_{il}$ represents the farm × time interaction, $(C \times T)_{kl}$ represents the clone × time interaction, $(F \times C \times T)_{ikl}$ represents the farm × clone × time interaction, and $(F \times B \times C)_{ijk}$ represents the experimental error.

The model-selection criteria were the Akaike information criterion (AIC), corrected Akaike information criterion (AICc), and Bayesian information criterion (BIC) (Correa Morales & Salazar Uribe, 2016). No transformations were applied to the data; only least-squares means were estimated. Tukey's multiple-comparison tests were performed at α = .05.

Graphs were generated using R (version 4.4.2; R Core Team, 2024) within the RStudio interface (Posit Team, 2024) to display the interactions between the factors and response variables.

3 RESULTS AND DISCUSSION

The farm × clone × year and clone × year interactions were significant ($p < .05$) for Pi and TSC. The farm × year and farm × clone interactions were significant ($p < .05$) for all variables (Table 1).

Table 1.

Analysis of Variance for Latex Diagnosis Variables

Source of variation	Suc (mmol/L)		R-SH (mmol/L)		Pi (mmol/L)		TSC (%)	
	F value	Pr > F	F value	Pr > F	F value	Pr > F	F value	Pr > F
Clone	33.86	**	67.64	**	91.72	**	20.31	**
Farm	11.83	**	8.07	ns	14.04	**	8.05	**
Farm × clone	4.28	**	11.03	**	6.38	**	5.71	**
Year	27.68	**	0.55	ns	3.64	ns	0.19	ns
Clone × year	2.69	ns	0.98	ns	5.29	*	12.75	**
Farm × year	2.44	**	2.23	*	17.95	**	3.17	**
Farm × clone × year	1.24	ns	1.36	ns	2.30	*	3.28	**

Note. ** = significant at $p < .01$; * = significant at $p < .05$; ns = not significant. Suc = sucrose content; Pi = inorganic phosphorus content; R-SH = thiol content; TSC = total solids content.

Source: Authors.

As shown by Tukey's multiple-comparison tests (α = .05) in Table 2, FX 3864 had higher estimated mean values than RRIM 600 for Suc and R-SH. Conversely, the RRIM 600 clone had higher mean values for Pi and TSC.

Table 2.

Comparison of Least-Squares-Adjusted Means Between Clones for Latex Diagnosis Variables

Clone	Suc (mmol/L)	R-SH (mmol/L)	Pi (mmol/L)	TSC (%)
FX 3864	7.64 a	0.26 a	9.70 a	46.55 a
RRIM 600	6.34 b	0.22 b	13.49 b	48.81 b

Note. Means sharing at least one letter within a column do not differ significantly according to Tukey's test (α = .05). Suc = sucrose content; Pi = inorganic phosphorus content; R-SH = thiol content; TSC = total solids content.

Source: Authors.

Figure 1 shows the farm × clone × year interaction, which had a significant effect on total solids content (TSC) ($p < .01$), revealing a combined response to clone, sampling year, and farm management. The RRIM 600 clone exhibited the highest TSC values in the first year, primarily on farms 8, 12, and 6 (53.7–55.6%), whereas the FX 3864 clone exhibited the lowest values during the first and second years on farms 11 and 12, respectively (≤ 40%) (Figure 1a).

Variations in TSC are attributed to differences in tapping frequency and ethephon use, which prolong latex flow and increase latex volume but gradually reduce solids concentration (Hernández-Arredondo et al., 2023; Putranto et al., 2015). The progressive decrease in solids concentration during latex flow may explain the lower TSC values observed in certain clones and years, as these lower values are associated with the depletion of sucrose reserves (Junaidi et al., 2019).

Significant variations in inorganic phosphorus (Pi) content in response to the farm × clone × year interaction demonstrate the sensitivity of phosphate metabolism to genetic and environmental factors. The higher values observed in RRIM 600 on farms 1, 6, 7, and 11 contrast with the lowest values recorded in FX 3864 on farm 5 (Figure 1b). This suggests that RRIM 600 has higher metabolic activity without compromising latex regeneration capacity, as the thiol concentration observed under the study conditions did not pose a significant risk to membrane integrity.

These results are consistent with those reported by Purwaningrum et al. (2019) and Yan et al. (2023), who identified Pi as a key regulator of energy status and biosynthetic activity in the laticifers of *Hevea brasiliensis* and reported a positive correlation between Pi and sucrose assimilation and latex flow dynamics.

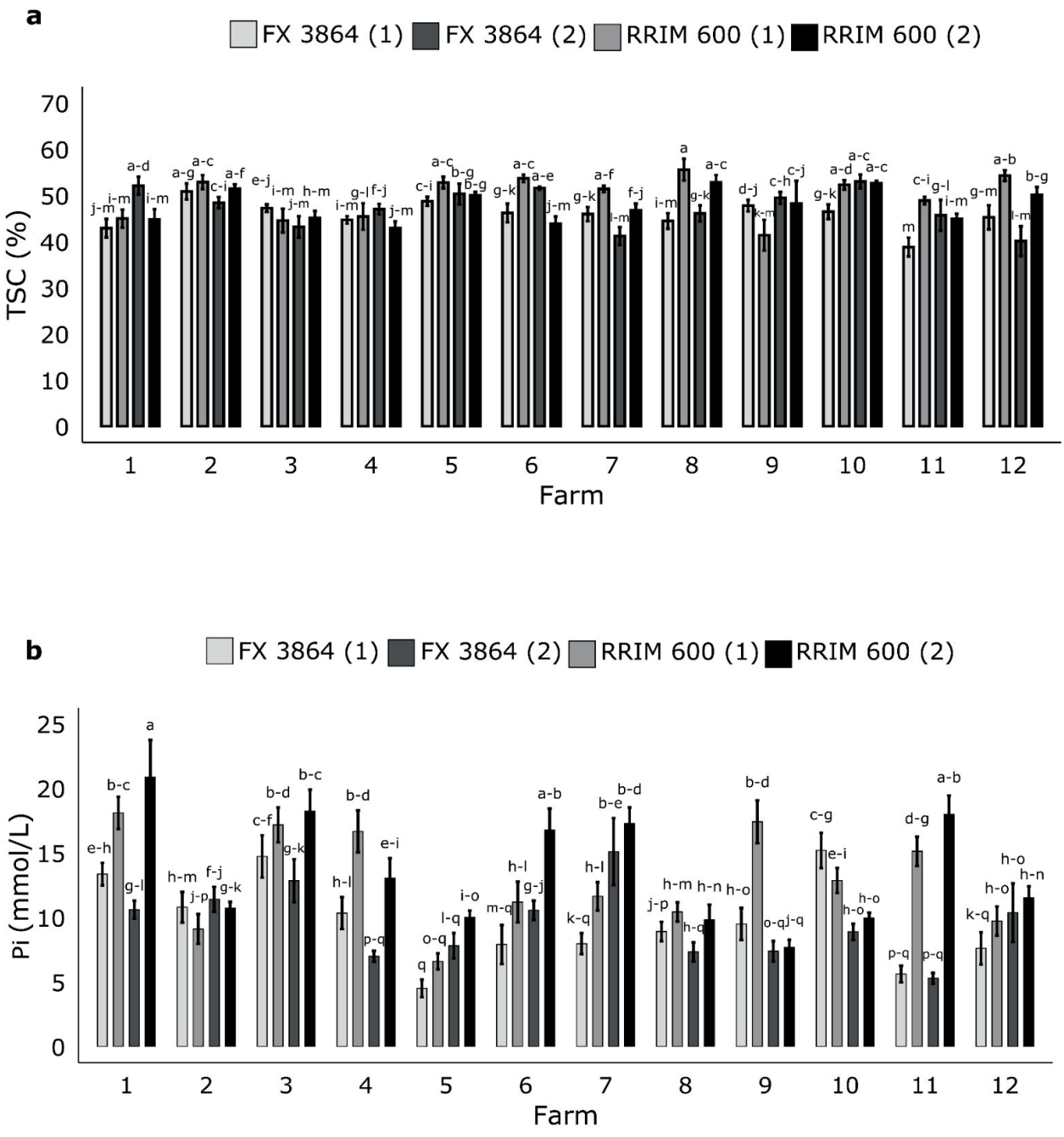
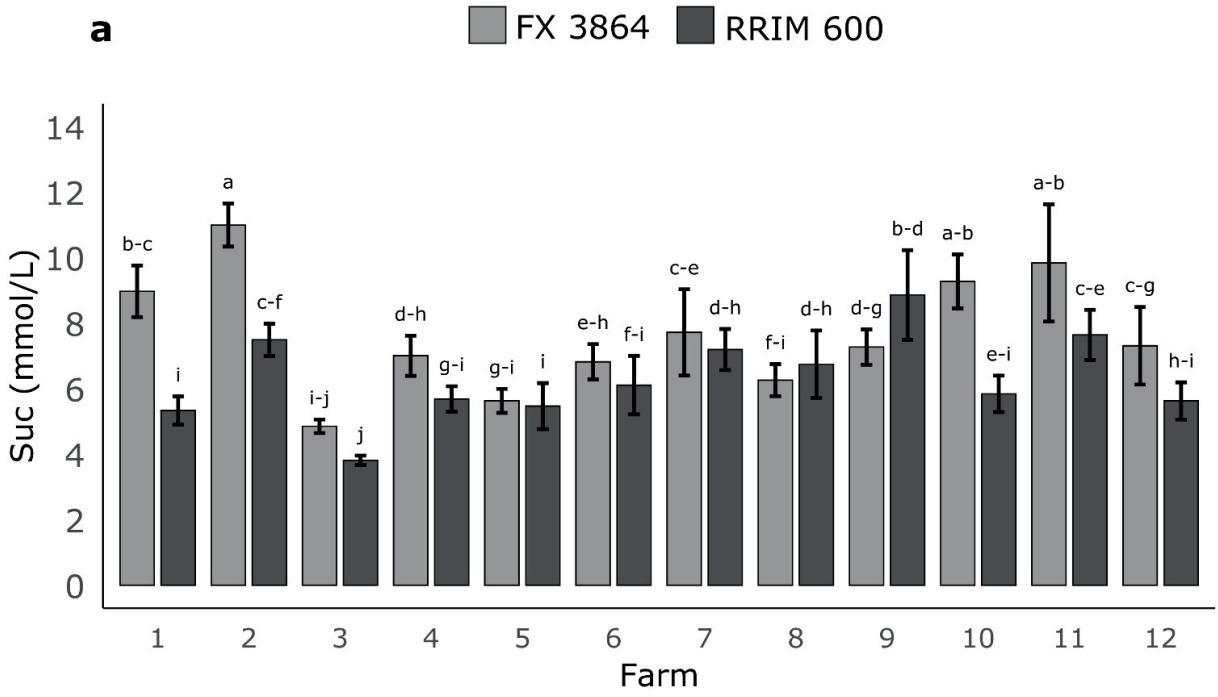


Figure 1. Farm × clone × year interaction for variables related to Latex Diagnosis, based on least-squares-adjusted means. (a) TSC = total solids content; (b) Pi = inorganic phosphorus content.

Source: Authors.

The significant farm × clone interaction showed that clone performance varied with local management and environmental conditions. FX 3864 exhibited higher and more stable Suc concentrations, particularly on farms 2, 10, and 11 (Figure 2a), accompanied by stable thiol levels (Figure 2b) and a more tightly regulated inorganic phosphorus (Pi) balance, indicating sustained metabolic activity and efficient latex regeneration (Jacob et al., 1989).

In contrast, RRIM 600 displayed greater variability in sucrose concentrations, with peaks on farms 9, 11, and 2, along with lower thiol content and higher, more variable Pi levels. These patterns are consistent with the management effects reported by Chantuma et al. (2006) and Sainoi et al. (2017), who found that increased tapping or stimulation reduced sucrose and thiol levels while increasing Pi, suggesting a combined influence of clone and local management on latex metabolism.



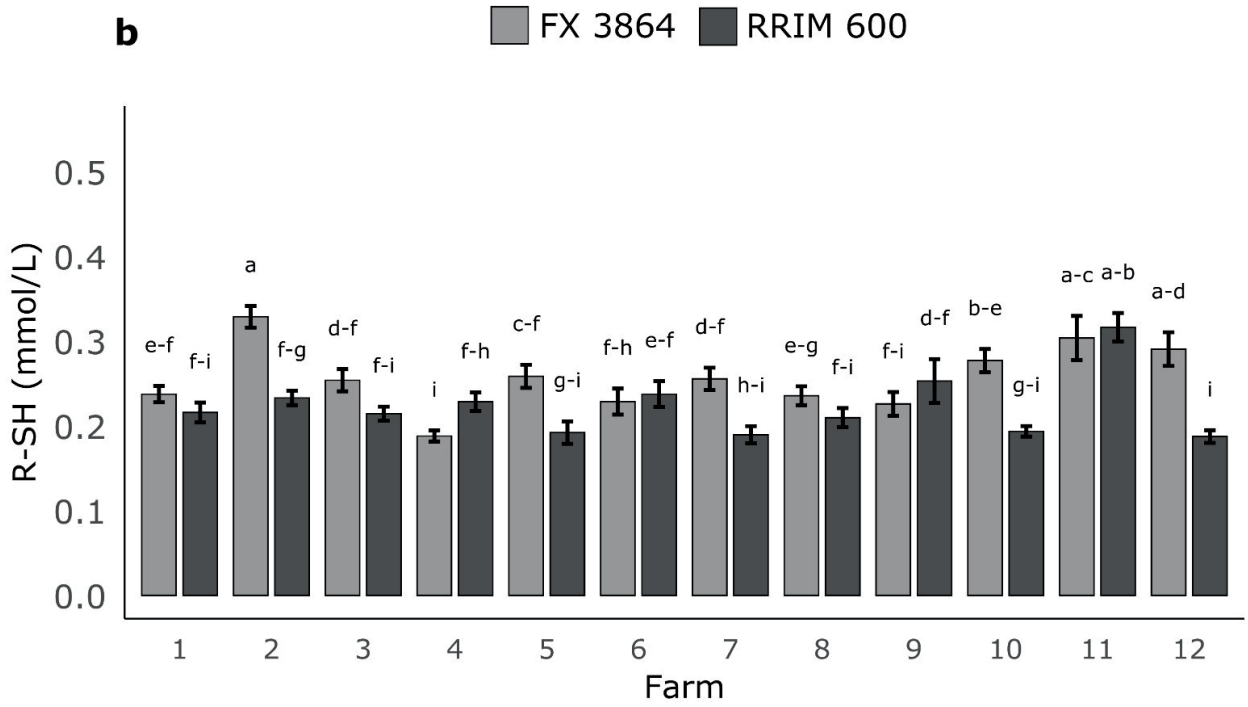


Figure 2. Farm × clone interaction for variables related to Latex Diagnosis, based on least-squares-adjusted means. (a) Suc = sucrose content; (b) R-SH = thiol content.

Source: Authors.

The analysis of the Latex Diagnosis parameters revealed significant differences between the RRIM 600 and FX 3864 clones. FX 3864 showed higher levels of sucrose and thiols, indicating greater energy reserves and protection against tapping panel dryness (TPD), and was classified as a clone with medium-to-low metabolic activity and high sugar availability (class C4), according to Gohet et al. (2005). In contrast, RRIM 600 had higher concentrations of inorganic phosphorus and total solids, which are associated with more active metabolism (Pethin et al., 2015).

The farm × clone interactions confirmed that physiological responses are strongly influenced by local management conditions, such as tapping frequency and tapping duration (Gohet et al., 2013; Lacote et al., 2004). FX 3864 maintained higher sucrose levels on most farms, reaching up to 10.85 mmol/L, a value comparable to that reported in Brazil (Moraes et al., 2011), while RRIM 600 showed levels similar to those observed in Guatemala (Sosof et al., 2011).

Both clones exhibited values above the threshold associated with overexploitation (< 5 mmol/L), suggesting that the stimulation practices were appropriate for the site conditions (d'Auzac & Jacob, 1989). However, applying the same stimulation program to both clones could limit the productive potential of FX 3864, which might benefit from management better tailored to its physiological

profile. Nevertheless, environmental factors such as water stress during the dry season can restrict its productivity (Gohet et al., 2015; Krishan, 2015; Yang et al., 2024).

4 CONCLUSIONS

Overall, the results have significant practical implications for rubber production systems in the Orinoquia region. The Latex Diagnosis parameters revealed significant differences between the clones, indicating that each requires a stimulation intensity suited to its metabolism. FX 3864, with its greater stability in sucrose and thiol concentrations, can therefore sustain more intensive management regimes with a lower risk of tapping panel dryness and greater resilience to environmental stress.

In contrast, RRIM 600, with its more active metabolism and higher levels of inorganic phosphorus and total solids, could achieve high yields under less frequent and more strictly controlled management. Tailoring tapping and stimulation practices to the physiological profile of each clone would optimize production efficiency, extend the productive life of the trees, and strengthen the economic sustainability of rubber plantations in the Orinoquia region.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors acknowledge the Colombian Agricultural Research Corporation (AGROSAVIA) and the Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD) for their scientific and technical support, staff training, and guidance in interpreting the results.

FUNDING

This publication is based on the results and information obtained from the project "Latex Diagnosis: A Tool to Increase Rubber Productivity in Colombia," which was implemented in four phases (IDs 1000689, 1001207, 1002163, and 1001752). The project was publicly funded by the Ministry of Agriculture and Rural Development of Colombia and implemented by the Colombian Agricultural Research Corporation (AGROSAVIA), in partnership with CIRAD, under Framework Agreement M498 and Addendum M498-05 at the La Libertad Research Center.

USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Not applicable.

CONFLICT OF INTEREST

All authors made substantial contributions to this study and approved the manuscript for publication. They declare that they have no conflicts of interest.

REFERENCES

Chantuma, P., Thanisawanyangkura, S., Kasemsap, P., Gohet, E., & Thaler, P. (2006). Distribution patterns of latex sucrose content and concurrent metabolic activity at the trunk level with different tapping systems and in latex production bark of *Hevea brasiliensis*. *Kasetsart Journal (Natural Science), 40*(3), 634–642. https://li01.tci-thaijo.org/index.php/anres/article/view/243718

Correa Morales, J. C., & Salazar Uribe, J. C. (2016). *Introducción a los modelos mixtos*. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Facultad de Ciencias.

Cruz, A. T. da, Pereira, J. C. da S., & Mendonça, S. R. (2017). Stimulation of latex production in seringueira (*Hevea brasiliensis* L.) with Ethrel doses. *Revista Árvore, 41*(5), e410511. https://doi.org/10.1590/1806-90882017000500011

d'Auzac, J., & Jacob, J.-L. (1989). The composition of latex from *Hevea brasiliensis* as a laticiferous cytoplasm. In J. d'Auzac, J.-L. Jacob, & H. Chrestin (Eds.), *Physiology of rubber tree latex: The laticiferous cell and latex—A model of cytoplasm* (pp. 59–96). CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781351075695-4

Delgado Huertas, H., Rangel, J. A., & Silva Parra, A. (2018). Caracterización de la fertilidad química de los suelos en sistemas productivos de la altillanura plana, Meta, Colombia. *Luna Azul*, (46), 54–69. https://doi.org/10.17151/luaz.2018.46.5

Gobernación del Departamento del Meta, & Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2004). *El Meta: un territorio de oportunidades* [CD-ROM].

Gohet, E., Cauchy, T., Soumahoro, M., Kotochi, C., Chegbene, P., Njoku, A., & Lesturgez, G. (2019, September 30–October 1). *Meta-analysis of a large industrial latex diagnosis database provides insight on* Hevea brasiliensis *clonal adaptation and site-specific yield potential in Western Africa* [Paper presentation]. International Rubber Conference 2019, Nay Pyi Taw, Myanmar. https://hal.science/hal-05174355

Gohet, E., Chantuma, P., Lacote, R., Obouayeba, S., Dian, K., Clément-Demange, A., Kurnia, D., & Eschbach, J. M. (2005). Latex clonal typology of *Hevea brasiliensis*: Physiological modelling of yield potential and clonal response to ethephon stimulation. In K. R. Vijayakumar, K. U. Thomas, R. Rajagopal, & K. Karunaichamy (Eds.), *Proceedings of the International Work-*

shop on Exploitation Technology, India 2003 (pp. 199–216). Rubber Research Institute of India.

Gohet, E., Saaban, I., Soumahoro, M., Uche, E., Soumahoro, B., & Cauchy, T. (2013, November 19–22). *Sustainable rubber production through good latex harvesting practices: An update on mature rubber fertilization effects on latex cell biochemistry and rubber yield potential* [Conference presentation]. IRRDB Workshop on Latex Harvesting Technology, Rubber Research Institute of Vietnam, Binh Duong, Vietnam.

Gohet, E., Thaler, P., Rivano, F., Chapuset, T., Gay, F., Chantuma, P., & Lacote, R. (2015). A tentative composite climatic index to predict and quantify the effect of climate on natural rubber yield potential. In Q. K. Le (Ed.), *Proceedings International Rubber Conference 2015: Productivity and quality towards a sustainable and profitable natural rubber sector* (pp. 345–356). Agricultural Publishing House.

Gutiérrez-Vanegas, A. J., Correa-Pinilla, D. E., Gil-Restrepo, J. P., López-Hernández, F. G., Guerra-Hincapié, J. J., & Córdoba-Gaona, O. (2020). Foliar and flowering phenology of three rubber (*Hevea brasiliensis*) clones in the eastern plains of Colombia. *Brazilian Journal of Botany, 43*(4), 813–821. https://doi.org/10.1007/s40415-020-00644-1

Herlinawati, E., Montoro, P., Ismawanto, S., Syafaah, A., Aji, M., Giner, M., Flori, A., Gohet, E., & Oktavia, F. (2022). Dynamic analysis of tapping panel dryness in *Hevea brasiliensis* reveals new insights on this physiological syndrome affecting latex production. *Heliyon, 8*(10), e10920. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10920

Hernández-Arredondo, J. D., Monsalve-García,D.A.,Guerra-Hincapié,J.J.,Huertas-Beltrán, R. L., López-Zuleta, S., & Córdoba-Gaona, O. de J. (2023). Estimulación de árboles de caucho bajo diferentes frecuencias de sangría en el noroeste de Colombia. *Colombia Forestal, 26*(1), 109–122. https://doi.org/10.14483/2256201X.19106

Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2004). *Estudio general de suelos y zonificación de tierras: Departamento del Meta, escala 1:100.000* [DVD-ROM]. https://metadatos.icde.gov.co/geonetwork/srv/api/records/14145366

International Rubber Research and Development Board. (1995, January 26). *Manual of biochemical and physiological tests* (Reference No. 1995/3).

Ismawanto, S., Aji, M., Lopez, D., Mournet, P., Gohet, E., Syafaah, A., Bonal, F., Oktavia, F., Taryono, Subandiyah, S., & Montoro, P. (2024). Genetic analysis of agronomic and physiological traits associated with latex yield revealed complex genetic bases in *Hevea brasiliensis*. *Heliyon, 10*(13), e33421. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e33421

Jacob, J.-L., Prévôt, J.-C., Lacote, R., Gohet, E., Clément, A., Gallois, R., Joët, T., Puja-de-Renaud, V., & d'Auzac, J. (1998). Les mécanismes biologiques de la production de caoutchouc par *Hevea brasiliensis*.

Plantations, Recherche, Développement, 5(1), 5–17.

Jacob, J.-L., Prévôt, J.-C., Lacrotte, R., & Eschbach, J.-M. (1995). Le diagnostic latex. *Plantations, Recherche, Développement, 2*(2), 33–37.

Jacob, J.-L., Prévôt, J.-C., Roussel, D., Lacrotte, R., Serres, E., d'Auzac, J., Eschbach, J.-M., & Omont, H. (1989). Yield limiting factors, latex physiological parameters, latex diagnosis, and clonal typology. In J. d'Auzac, J.-L. Jacob, & H. Chrestin (Eds.), *Physiology of rubber tree latex: The laticiferous cell and latex—A model of cytoplasm* (pp. 345–382). CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781351075695-16

Jacob, J.-L., Serres, E., Prévôt, J.-C., Lacrotte, R., Vidal, A., Eschbach, J.-M., & d'Auzac, J. (1988). Mise au point du diagnostic latex chez l'hévéa. *Agritrop, 12*(2), 97–118.

Junaidi, Clément-Vidal, A., Nuringtyas, T. R., Gohet, E., Subandiyah, S., & Montoro, P. (2022). A meta-analysis of latex physiology studies reveals limited adoption and difficulties to interpret some latex diagnosis parameters in *Hevea brasiliensis*. *HAYATI Journal of Biosciences, 30*(2), 358–371. https://doi.org/10.4308/hjb.30.2.358-371

Junaidi, Nuringtyas, T. R., Clément-Vidal, A., Flori, A., Syafaah, A., Oktavia, F., Ismawanto, S., Aji, M., Subandiyah, S., & Montoro, P. (2022). Analysis of reduced and oxidized antioxidants in *Hevea brasiliensis* latex reveals new insights into the regulation of antioxidants in response to harvesting stress and tapping panel dryness. *Heliyon, 8*(7), e09840. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09840

Junaidi, Wijaya, A., Rachmawan, A., & Andriyanto, M. (2019). Total solid content and compound properties from different collection time of *Hevea brasiliensis* latex. *Acta Technologica Agriculturae, 22*(4), 104–108. https://doi.org/10.2478/ata-2019-0019

Krishan, B. (2015). Growth assessment of popular clones of natural rubber (*Hevea brasiliensis*) under warm dry climatic conditions of Chhattisgarh state, central India. *Journal of Experimental Biology and Agricultural Sciences, 3*(2), 157–161. https://doi.org/10.18006/2015.3(2).157.161

Lacote, R., Gabla, O., Obouayeba, S., Eschbach, J. M., Rivano, F., Dian, K., & Gohet, E. (2010). Long-term effect of ethylene stimulation on the yield of rubber trees is linked to latex cell biochemistry. *Field Crops Research, 115*(1), 94–98. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.10.007

Lacote, R., Obouayeba, S., Clément-Demange, A., Dian, K., Gnagne, M. Y., & Gohet, E. (2004). Panel management in rubber (*Hevea brasiliensis*) tapping and impact on yield, growth, and latex diagnosis. *Journal of Rubber Research, 7*(3), 199–217.

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2021, March). *Cadena caucho: Indicadores, apoyos* [PowerPoint slides]. https://sioc.minagricultura.gov.co/Caucho/Documentos/2021-03-31%20Cifras%20Sectoriales.pdf

Moraes, L. A. C., Moreira, A., Fontes, J. R. A., Cordeiro, E. R., & Moraes, V. H. de F. (2011). Assessment of rubber tree panels under crowns resistant to South American leaf blight. *Pesquisa Agropecuária Brasileira, 46*(5), 466–473. https://doi.org/10.1590/S0100-204X2011000500003

Nguyen, V. H. T., Pham, G. N. T., Le, D. N. V., Tran, N. M. T., Nguyen, T. T. T., Kim, T. T., Luong, T. H., Truong, H. V., Nguyen, N., Nguyen, K. M., Truong, T. V., Truong, H. V., & Do, T. K. (2017). The *Hevea* latex diagnosis as a crop harvest management technique: Consequences of study and implementations on PB 260 in south east of Vietnam. *International Proceedings of IRC 2017*, 387–388.

Obouayeba, S., Konan, D., Diarrassouba, M., Lehi, M. I., Koffi, A., Ballo, E. K., Adou, B. Y. C., & Essehi, J. L. (2021). Relationship between the intensity of latex harvesting and the tapping panel dryness expression of clone GT 1 of *Hevea brasiliensis* Muell. Arg. in South-East Côte d'Ivoire. *Journal of Advances in Biology & Biotechnology, 24*(5), 36–45. https://doi.org/10.9734/jabb/2021/v24i530216

Pethin, D., Nakkanong, K., & Nualsri, C. (2015). Performance and genetic assessment of rubber tree clones in southern Thailand. *Scientia Agricola, 72*(4), 306–313. https://doi.org/10.1590/0103-9016-2014-0354

Pinizzotto, S. (2021, November 1). *Beyond COP 26: Adaptation and mitigation actions—An urgent call for natural rubber*. International Rubber Study Group. https://www.rubberstudy.org/content/29026

Posit Team. (2024). *RStudio: Integrated development environment for R* [Computer software]. Posit Software, PBC. https://posit.co/

Purwaningrum, Y., Asbur, Y., & Junaidi. (2019). Latex quality and yield parameters of *Hevea brasiliensis* (Willd. ex A. Juss.) Müll. Arg. clone PB 260 for different tapping and stimulant application frequencies. *Chilean Journal of Agricultural Research, 79*(3), 347–355. https://doi.org/10.4067/S0718-58392019000300347

Putranto, R.-A., Herlinawati, E., Rio, M., Leclercq, J., Piyatrakul, P., Gohet, E., Sanier, C., Oktavia, F., Pirrello, J., Kuswanhadi, & Montoro, P. (2015). Involvement of ethylene in the latex metabolism and tapping panel dryness of *Hevea brasiliensis*. *International Journal of Molecular Sciences, 16*(8), 17885–17908. https://doi.org/10.3390/ijms160817885

R Core Team. (2024). *R: A language and environment for statistical computing* [Computer software]. R Foundation for Statistical Computing. https://www.R-project.org/

Rojas Molina, J., Rojas Buitrago, M. A., Rueda, G. H., Jaimes Suárez, Y., & Furtado, E. L. (2017). Efecto de sistemas de sangría sobre la productividad de *Hevea brasiliensis* en el Magdalena Medio santandereano. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas, 11*(1), 184–192. https://doi.org/10.17584/rcch.2017v11i1.6160

Sainoi, T., Sdoodee, S., Lacote, R., Gohet, E., & Chantuma, P. (2017). Stimulation affecting latex physiology and yield under low frequency tapping of rubber (*Hevea brasiliensis*) clone RRIM 600 in southern Thailand. *Australian Journal of Crop Science, 11*(2), 220–227. https://doi.org/10.21475/ajcs.17.11.02.p305

Sosof, J. C., Lacote, R., Chapuset, T., Anléu, J., Rivano, F., & Nájera, C. (2011). *Evaluation of some clones (*Hevea brasiliensis*) in a small-scale trial in the southern part of Guatemala*. Rubber Authority of Thailand. https://cads.arda.or.th/th/documents/research/3fca0f7d-44fe-43ae-bb2d-ed0b-3c7605b5_th-TH

Sterling Cuéllar, A., Andrade Ramírez, T. K., Clavijo Arias, E. A., Guaca Cruz, L., & Suárez Salazar, J. C. (2020). Evaluación de los rasgos de crecimiento, nutricionales y fisiológicos de genotipos caquetenses selección ECC 1 de caucho (*Hevea brasiliensis*) en campos clonales a gran escala en el Caquetá. In A. Sterling Cuéllar & C. H. Rodríguez León (Eds.), *Valoración de nuevos clones de* Hevea brasiliensis *con proyección para la Amazonia colombiana: Fases de pre y post-sangría temprana en el Caquetá* (pp. 127–148). Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas SINCHI.

Vijayakumar, K. R., Gohet, E., Thomas, K. U., Wei, X., Sumarmadji, Rodrigo, L., Do, K. T., Sopchoke, P., Karunaichamy, K., & Mohd Akbar Md. Said. (2009). Revised international notation for latex harvest technology. *Journal of Rubber Research, 12*(2), 103–115.

Yan, Y., Liang, C., Liu, X., Tan, Y., Lu, Y., Zhang, Y., Luo, H., He, C., Cao, J., Tang, C., & Liu, K. (2023). Genome-wide association study identifies candidate genes responsible for inorganic phosphorus and sucrose content in rubber tree latex. *Tropical Plants, 2*, Article 24. https://doi.org/10.48130/TP-2023-0024

Yang, H., Dai, L., Liu, M., Fan, X., Lu, L., Guo, B., Wang, Z., & Wang, L. (2024). Integrative analysis of transcriptome and metabolome reveals how ethylene increases natural rubber yield in *Hevea brasiliensis*. *Frontiers in Plant Science, 15*, Article 1444693. https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1444693

Conflicto de intereses
Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Licencia de Creative Commons
Revista de Investigación Agraria y Ambiental is licensed under a Creative Commons Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual 4.0 Internacional License.

Fecha de recibido: 31 de julio de 2025
Fecha de aceptado: 25 de marzo de 2026
DOI: 10.22490/21456453.10108

ANÁLISIS COMPARATIVO DE TÉCNICAS DE PRONÓSTICO PARA VARIABLES DE PRODUCCIÓN Y PRECIOS DE CAFÉ COLOMBIANO

COMPARATIVE ANALYSIS OF FORECAST TECHNIQUES FOR PRODUCTION VARIABLES AND PRICES OF COLOMBIAN COFFEE

Ximena Cifuentes Wchima[1]
Luis Miguel Mejía Giraldo[2]

Citación: Cifuentes Wchima, X., Mejía Giraldo, L.M. (2026). Análisis comparativo de técnicas de pronóstico para variables de producción y precios de café colombiano. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental, 17*(2), 139-158. https://doi.org/10.22490/21456453.10108

[1] Magíster en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente, Decana de la Facultad de Ingenierías Universidad La Gran Colombia, Armenia, Colombia, defingenieria@ugca.edu.co. orcid.org/0000-0001-5392-4483

[2] Magíster en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente, Líder de Investigaciones de la Facultad de Ingenierías Universidad La Gran Colombia, Armenia, Colombia, mejiagluismiguel@miugca.edu.co. orcid.org/0000-0003-2940-0115

RESUMEN

El presente trabajo de investigación gira en torno a la modelación estocástica de regresión simple y múltiple de variables asociadas al negocio de café, encontrándose modelos no lineales simples altamente significativos (valor p = 0,0000) de variables como consumo doméstico en miles de sacos, las existencias iniciales brutas, el precio pagado a productores y el precio del café en bolsa de Nueva York. A su vez, se aprecia que se consolidan modelos de regresión múltiples altamente significativos entre las variables precio pagado a productores, precio de café en bolsa de Nueva York y la diferencia entre ambos precios (valor p = 0,0000), quienes a su vez denotan su alta bondad de ajuste y potencial para la proyección predictiva de dichas variables desde el contexto estocástico sin olvidar la importancia del razonamiento propio de las dinámicas de mercado propio del análisis fundamental del mismo.

Palabras clave: Coffea, modelamiento, regresión, no linealidad.

ABSTRACT

This research work revolves around the stochastic modeling of simple and multiple regression of variables associated with the coffee business; finding highly significant simple nonlinear models (p value = 0.0000) of variables such as domestic consumption in thousands of bags, initial gross stocks, the price paid to producers and the price of coffee on the New York stock exchange. In turn, it can be seen that highly significant multiple regression models are consolidated between the variables price paid to producers, price of coffee on the New York Stock Exchange and the difference between both prices (value p=0.0000), who in turn denote its high goodness of fit and potential for the predictive projection of said variables from the stochastic context without forgetting the importance of the reasoning of the market dynamics of its fundamental analysis.

Keywords: *Coffea*, Modeling, Regression, Nonlinearity.

RESUMEN GRÁFICO



Fuente: autores (2025).

1 INTRODUCCIÓN

Lograr un rendimiento agrícola sostenible requiere no solo promover el crecimiento agrícola sino también reducir la inestabilidad de la producción. La agricultura, un sector clave para garantizar la seguridad alimentaria y mantener la estabilidad macroeconómica para muchos países productores de café, incluida Colombia, es vulnerable a los desastres naturales, como fenómenos climáticos y ataque de plagas y enfermedades (Swain, 2014; FAO, 2021), lo cual conlleva a una inestabilidad en la producción que, a su vez, aumenta la inestabilidad de los precios y la vulnerabilidad de los productores del campo, exponiéndolos a las fuerzas del mercado, sumado a que esto trae consigo un impacto en la gestión alimentaria y la estabilidad macroeconómica de un país tal como lo resaltan Chand y Raju (2009) y FAO (2015).

Es importante agregar que el crecimiento agrícola es crucial para el desarrollo económico de los países en desarrollo, donde la política para el crecimiento agrícola se puede lograr a través de la expansión de la misma, tanto a nivel horizontal como vertical, lo que implica, además, expandir el área de tierras con enfoque agroindustrial e introducir

tecnologías modernas que ayuden a aumentar la productividad, lo que aseveran Pretty y Bharucha (2014) y El-Rasoul et al. (2020). No obstante, se ha planteado la hipótesis de que la producción en campo debe ser mediada principalmente por el uso de tecnologías agrícolas modernas, como una mejor estrategia en contraposición a la expansión de la frontera agrícola, ya que esto conduce a fenómenos de deforestación (Angelsen & Kaimowitz, 2001; Azadi et al., 2011; Laurance et al., 2014). En consecuencia, se cree que el avance y uso de la tecnología agrícola contribuye a un sistema agrícola más sostenible que promueve la mejora continua de la producción agrícola.

Sin embargo, numerosos investigadores en el ámbito de la producción agrícola enfatizan que el crecimiento económico —entendido dentro de un marco de sostenibilidad— , así como la variabilidad climática y de precios, se han consolidado como indicadores clave para evaluar el desempeño de este sector, tal como lo resalta Sen (1967), quien primero observó un vínculo causal entre el crecimiento de la productividad agrícola y la inestabilidad y planteó la hipótesis de que la variabilidad en la producción aumenta a medida que el cultivo se expande a tierras marginales y aumenta el uso de insumos comprados, sumado a lo planteado por Rao (1975), quien argumentó que el crecimiento basado en la productividad da como resultado una mayor variabilidad de la producción porque la variabilidad de la productividad es mucho mayor que la variabilidad del área. Posteriormente, Narain (1977) también cuestionó si la tecnología de semillas y fertilizantes aumenta o no la productividad y disminuía la variabilidad de la producción, ya que de manera similar, algunos estudios recientes, como los de Chand & Raju (2009), Ayalew & Sekar (2016), Ikuemonisan et al. (2020) y Sadiq et al. (2020), que examinaron los impactos del cultivo en tierras marginales adicionales y la adopción de tecnologías mejoradas en la variabilidad de la producción de cultivos, mostrándose una menor variabilidad de la producción debido a la adopción de tecnología moderna sumado a la expansión marginal de la tierra, mientras que otros, como Mahir & Abdelaziz (2011); Hemant (2015) y Deb & Soumitra (2015), informaron lo contrario, lo cual sigue dejando abierto el debate con respecto a la búsqueda de una productividad sostenible para los agricultores.

Desde una mirada territorial, la agricultura juega un papel clave en la economía colombiana, contribuyendo positiva y significativamente con el PIB y en la campaña comercial 2020/21. Destacándose que, el país ganó 4406 millones de dólares estadounidenses por concepto de exportaciones agrícolas (MAC, 2021) y donde la industria del café en Colombia posee un rol históricamente preponderante, dada su contribución a la economía nacional en general y a las exportaciones en particular (FCC, 2021), reportando un crecimiento del 21,4 % para 2021, apoyando sustancialmente a la producción agrícola total.

Es de resaltar que el café es una bebida no solo apreciada en países que tienen tradición en su comercio. Debido a la importancia de su comercialización, la industria del café es expresiva de la economía mundial (Novanda

et al., 2018) y de acuerdo con la información más reciente proporcionada por la Organización Internacional del Café, el consumo de la cosecha de café de abril de 2019 a marzo de 2020 fue de 164,2 millones de sacos de 60 kg en el mundo y la previsión, y se proyectó un aumento de 1,3 % para el próximo año (OIC, 2020).

El consumo interno de café y la exportación han movido la balanza comercial internacional; sin embargo, las exportaciones de café están sujetas a fluctuaciones de precios, lo que genera riesgos para los agricultores, importadores, instituciones de comercialización y consumidores (Novanda et al., 2018). Según Consuegra & Garcia-Verdugo (2017), así como Cuaresma et al. (2018), esto se debe a la volatilidad causada por los cambios en las tendencias de los precios del mercado mundial.

Los mismos autores afirman que las metodologías utilizadas para predecir los precios de las materias primas son cada vez más importantes, a pesar de las dificultades intrínsecas relacionadas con este tema. Cuando los resultados generados son consistentes, ayudan no solo a la toma de decisiones, sino a toda la cadena productiva, tal como lo resaltan Bacci et al. (2019). Por lo tanto, se vuelve relevante investigar nuevas estrategias y herramientas para superar este problema y, debido a la importancia del tema, se han desarrollado estudios relevantes sobre la previsión del precio del café en diferentes lugares del mundo, siendo los modelos estadísticos y el análisis cuantitativo una alternativa para la búsqueda de patrones para la toma de decisión en aspectos económicos. Tal es el caso de Milas et al. (2004) que desarrollaron modelos de corrección de errores lineales y no lineales para los precios al contado de cuatro tipos diferentes de café, como son arábica sin lavar (Brasil), arábica suave colombiano (Colombia), otros arábica suave (de otros países de América Latina) y robusta (de África y Asia). Por otro lado, autores como Naveena (2017) y Naveena et al. (2017) utilizaron modelos lineales como enfoques exponenciales (modelo de Holt, modelo de tendencia lineal de Brown, método de suavizado exponencial estacional de Winter, Holt-Winters, ARIMA, GARCH), redes neuronales artificiales y cadenas de Markov para el pronóstico del precio y la posterior exportación del café indio.

Ayyanathan & Kannammal (2014) utilizaron una red neuronal artificial (ANN) y una máquina de vectores de soporte (SVM) para la predicción de precios de una empresa líder en exportación de café verde en el mercado de valores indio. Los mismos autores desarrollaron un sistema de soporte de decisiones cognitivas para la cadena de suministro de café verde indio basado en modelos ARIMA y Least Square SVR para resolver el mismo problema. Además, enfoques lineales como los modelos de media móvil integrada autorregresiva (ARIMA) han sido ampliamente utilizados para la previsión del precio del café en estudios como los de Ayyanathan & Kannammal (2014), Fousekis (2017) y Yashavanth et al. (2017) y, si bien estas investigaciones demuestran la viabilidad de dichas metodologías estadísticas para el seguimiento y la inteligencia de negocios en el sector cafetero, la literatura aún presenta vacíos en cuanto a la aplicación y compara-

ción sistemática de técnicas de regresión —tanto simples como múltiples, lineales y no lineales— específicamente para variables de producción y precios del café colombiano. En particular, se ha prestado menor atención a la modelación estocástica que integre simultáneamente variables clave como el precio pagado al productor, el precio en bolsa y sus diferencias, así como a la evaluación de su capacidad predictiva en el contexto de la volatilidad del mercado local. Este estudio busca abordar dicha brecha, proponiendo y validando modelos de regresión adaptados a la dinámica propia del café colombiano, con el fin de ofrecer herramientas robustas para la toma de decisiones estratégicas en el sector.

Es de agregar que el presente estudio gira en torno a desarrollar y evaluar modelos de regresión simple y múltiple para pronosticar variables de producción y precios del café colombiano, con el fin de contribuir a la toma de decisiones estratégicas en el sector cafetero, soportado en tres objetivos específicos esenciales que son, en primera instancia, identificar y modelar relaciones no lineales significativas entre variables clave del sector cafetero (como consumo doméstico, existencias iniciales brutas, precio pagado a productores y precio en bolsa de Nueva York) y el tiempo, mediante técnicas de regresión simple. Posteriormente, construir y validar modelos de regresión múltiple que expliquen la variabilidad del precio pagado a productores y del precio en bolsa del café colombiano, considerando variables predictoras como producción total, consumo doméstico, exportaciones y diferencias de precios y, finalmente, analizar la capacidad predictiva y la bondad de ajuste de los modelos propuestos, contrastando los resultados con hallazgos previos en la literatura y reflexionando sobre su aplicabilidad en el contexto del mercado cafetero colombiano.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

Datos y fuentes de datos

Este estudio utiliza datos secundarios obtenidos de la Organización Internacional del Café de datos de precios mundiales/internacionales del café colombiano para el periodo comprendido desde 1990 hasta 2020 para los datos anuales de las variables producción total (número de sacos de 60 kg), consumo doméstico (número de sacos de 60 kg), existencias iniciales brutas (número de sacos de 60 kg), exportaciones de todas las formas de café (número de sacos de 60 kg), precio pagado a cultivador (centavos de dólar por libra), precio en bolsa de Nueva York (centavos de dólar por libra), así como la diferencia del precio del café en bolsa menos el precio al productor, reportadas en las bases de dicha organización por medio de su website https://www.ico.org/es/new_historical_c.asp, respectivamente.

Modelos de pronóstico

Modelos de regresión simple

El método de regresión simple se soporta en el criterio de una variable Yi (producción total, consumo doméstico, existencias iniciales brutas, exportaciones de todas las formas de café, precio pagado a cultivador, precio en bolsa de Nueva York), en función de una variable Xi y dicho modelo puede ser de tipo lineal o no lineal modelos de regresión simple no lineal (cuadrática, curva S, logarítmica, etc.), para modelar variables individuales (como consumo, existencias y precios), en función del tiempo, respectivamente, el cual se validó para cada variable de análisis en función de la variable Xi tiempo en años:

$$Yi = f\,(Xi,\ tiempo\ en\ años)$$

Y su validación se llevó a cabo con base en el análisis de varianza y coeficiente de determinación R^2.

Modelos de regresión múltiple

Adicionalmente, se utilizaron modelos de regresión lineal múltiple, mediante el método Forward para identificar las variables predictoras más significativas (como precio en bolsa y diferencia de precios), validando los modelos mediante análisis de varianza (ANOVA) y coeficiente de determinación R^2.

Esta tipología de modelos se soporta en el criterio que una variable y_i se analiza a partir de dos o más variables predictoras x_i, siendo de la siguiente forma:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \ldots + \beta_p x_{ip} + \varepsilon_i$$

Indica que, existen diversas variables independientes x_i que explican a y_i.

Para la estimación de los betas o parámetros del modelo se resuelve a través de la siguiente forma:

$$\hat{\beta} = (x'x)^{-1} * (x'y)$$

Bajo un criterio algebraico es de la presente forma:

$$\hat{\beta} = \left(\begin{pmatrix} x_1 & x_2 & \ldots & x_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \ldots \\ x_n \end{pmatrix} \right)^{-1} * \left(\begin{pmatrix} x_1 & x_2 & \ldots & x_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \ldots \\ y_n \end{pmatrix} \right)$$

Y su validación, al igual que en regresión lineal simple, se llevó a cabo con base en el análisis de varianza y coeficiente de determinación R^2, como se mencionó con antelación.

Para el presente estudio, los modelos de regresión múltiples desarrollados fueron:

- Precio pagado a productores (US) en función de las variables predictoras o independientes: año, producción total (miles de sacos), consumo doméstico (miles de sacos), existencias iniciales brutas, exportaciones de todas las formas de café, precio en bolsa café colombiano y diferencia entre precios, respectivamente.

- Precio en bolsa café colombiano en función de las variables predictoras: año, producción total (miles de sacos, consumo doméstico (miles de sacos), Existencias iniciales brutas, exportaciones de todas las formas de café, precio pagado a productores (US) y diferencia entre precios, respectivamente.

Es importante resaltar que se aplicaron pruebas del tipo Forward (paso a paso) para cada modelo de regresión, con el fin de obtener el modelo que mayor significancia alcanzaba con el menor número de variables predictoras (criterio de parsimonia).

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Modelos de regresión simple

Al realizar los respectivos modelos de regresión producción total, consumo doméstico, existencias iniciales brutas, exportaciones de todas las formas de café, precio pagado a cultivador, precio en bolsa de Nueva York, el presente cuadro resume la variable en función del tiempo en años, el modelo, su significancia y coeficiente de determinación (R^2), respectivamente (Tabla 1 y Figura 1).

Tabla 1.

Resumen de modelos de regresión para las diferentes variables

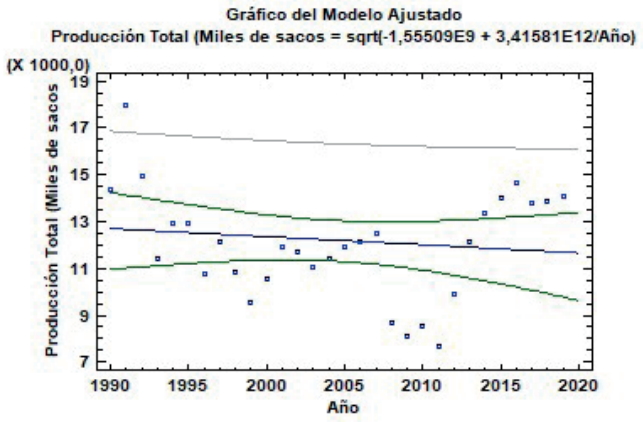
Variable	Tipo	Modelo	Valor p	R2
Producción total (miles de sacos)	Cuadrado-Y inversa de X	$Produccion\ total = \sqrt{-1{,}55509\ E9 + \frac{3{,}41581\ E12}{Año}}$	0,4816	1,78
Consumo doméstico (miles de sacos)	Cuadrado doble	$Consumo\ Doméstico = \sqrt{5{,}39665\ E7 + 13{,}9366 * Año^2}$	0,0000**	53,23
Existencias iniciales brutas	Curva S	$Existencias\ iniciales\ brutas = e^{-132{,}305+\frac{280242}{Año}}$	0,0000**	82,74
Exportaciones de todas las formas de café	Doble inverso	$Exportaciones = \frac{1}{0{,}000953793 - \frac{1{,}7238}{Año}}$	0,2792	4,17
Precio pagado a productores (US centavos)	Curva S	$Precio = e^{60{,}8937-\frac{112907}{Año}}$	0,0003**	35,52
Precio en bolsa de Nueva York (US centavos)	Log Y - Cuadrado X	$Precio\ bolsa = e^{-79{,}5375+1{,}88473*\sqrt{Año}}$	0,0071**	20,43

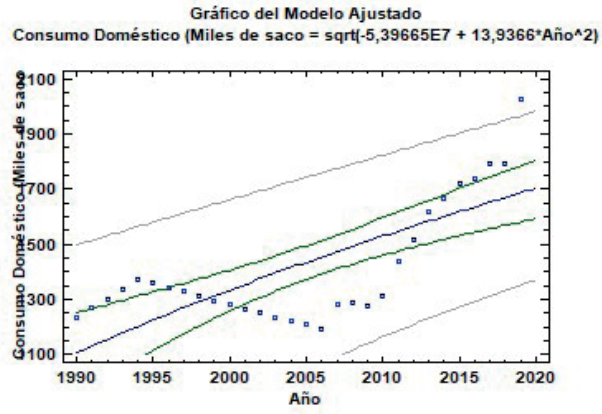
** Efecto altamente significativo

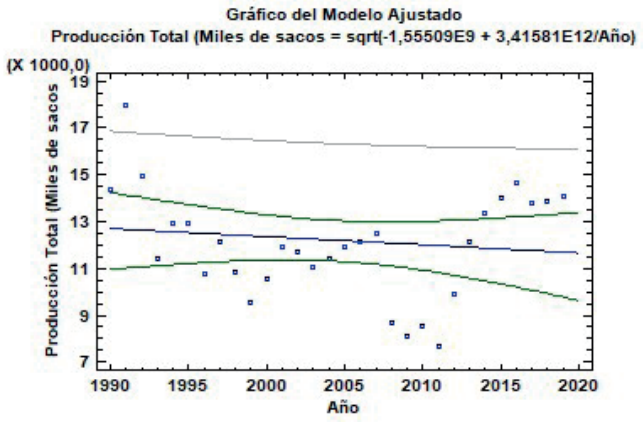
Fuente: autores (2022).

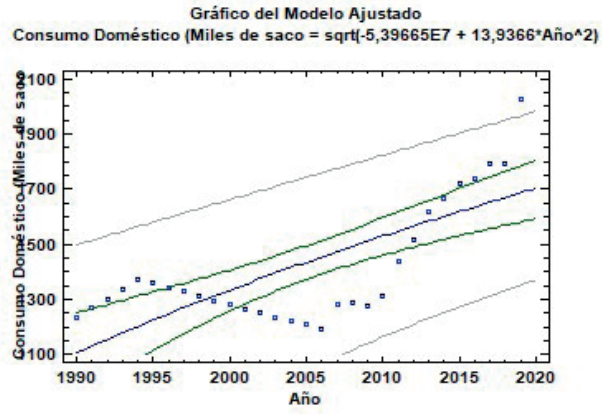
Como se aprecia en la tabla 1, los modelos para consumo doméstico, existencias iniciales brutas, precio pagado a productores y precio en bolsa de Nueva York son altamente significativos, lo cual brinda la posibilidad de pronósticos en función del tiempo en años, que corrobora lo planteado por Sen (1967), Rao (1975), Chand & Raju (2009), FAO (2015), Novanda et al. (2018) y Consuegra y Garcia-Verdugo (2017), quienes también resaltan dichos aspectos. Por otro lado, la producción total y las exportaciones de todas las formas de café no son significativas, denotando su falta de representatividad estadística, posiblemente por aspectos de volatilidad de mercados y la inestabilidad de la producción por factores climáticos, como lo resaltan Cuaresma et al. (2018).

Como se mencionó con antelación, para todos los casos, los modelos son no lineales, lo cual se evidencia en la figura 1.









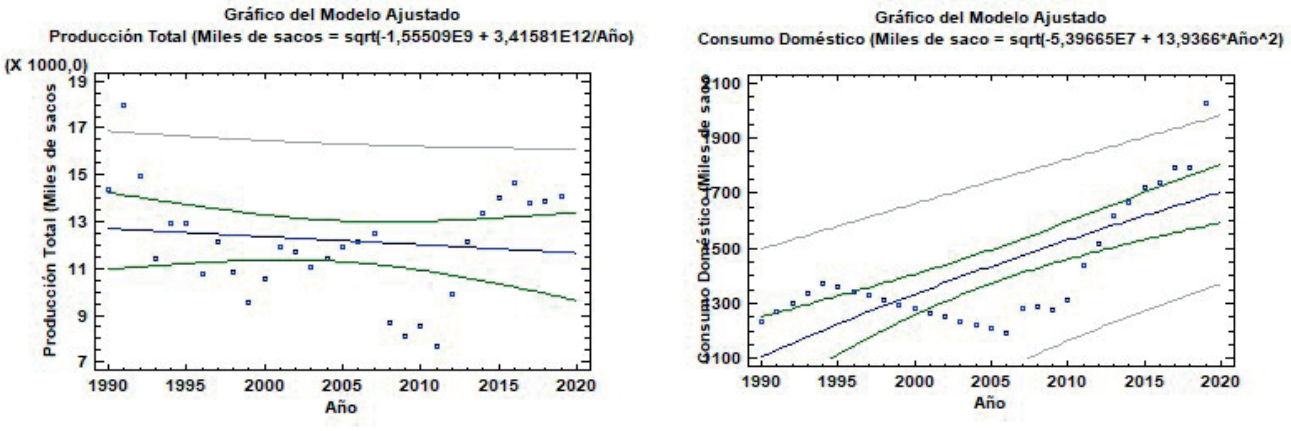


Figura 1. Tipologías de modelos para producción de café

Fuente: Los autores (2022)

De lo anterior, se evidencia la no linealidad del comportamiento de las diferentes variables en función del tiempo en años; no obstante, solo se aprecia una disminución en la variable "existencias iniciales brutas", mientras que en las demás variables se encontró un comportamiento discernible no lineal, lo cual conlleva a la necesidad de análisis de las series temporales en su respectiva descomposición en tendencia, ciclo, estacional e irregular con el fin de determinar posibles patrones temporales y potenciales anomalías estadísticas, corroborando así lo planteado previamente con respecto a los diferentes autores mencionados para el seguimiento de inteligencia analítica de café.

Regresiones lineales múltiples

Regresión lineal múltiple para precio pagado a productores (US)

La variable "precio pagado a productores" se contrastó con las variables predictoras año, producción total (miles de sacos), consumo doméstico (miles de sacos), existencias iniciales brutas, exportaciones de todas las formas de café, precio en bolsa café colombiano y diferencia entre precios, respectivamente.

Al realizar el análisis del modelo de regresión lineal múltiple con base en el método Forward se encontró que las variables de mayor representatividad sobre el precio pagado a los productores son el precio en bolsa del café colombiano y la diferencia entre precios (Tabla 2), siendo ambas altamente significativas.

Tabla 2.

Variables representativas del modelo

Parámetro	Estimación	Error estándar	Estadístico T	Valor-P
CONSTANTE	0,0015759	0,00156216	1,0088	0,3220
Precio en bolsa café colombiano	0,999978	0,000014213	70356,7	0,0000**
Diferencia entre precios	-0,999947	0,0000520976	-19193,7	0,0000**

** Efecto altamente significativo

Fuente: autores (2022).

A su vez, al realizar el respectivo análisis de varianza (Tabla 3), se aprecia que el modelo es altamente significativo (valor p = 0,0000).

Tabla 3.

Análisis de varianza para precio pagado a productores

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	54449,7	2	27224,8	3229324077,86	0,0000**
Residuo	0,000227624	27	0,0000084305		
Total (Corr.)	54449,7	29			

** Efecto altamente significativo

Fuente: autores (2022).

Es de resaltar, además, que el coeficiente de determinación R-cuadrado fue igual a 100 %, demostrándose que el precio pagado a productores depende esencialmente de las variables de precio en bolsa del café colombiano y la respectiva diferencia entre precios y cuyo modelo de regresión es:

*Precio pagado a productores (US) = 0,0015759 + 0,999978*Precio en colsa café colombiano - 0,999947*Diferencia entre precios*

Al realizar el análisis entre los valores observados (datos históricos) y los predichos (generados por el modelo de regresión al remplazar los valores de las variables predictoras en la ecuación) se observa una alta bondad de ajuste que ratifica la idoneidad del modelo (Figura 2).

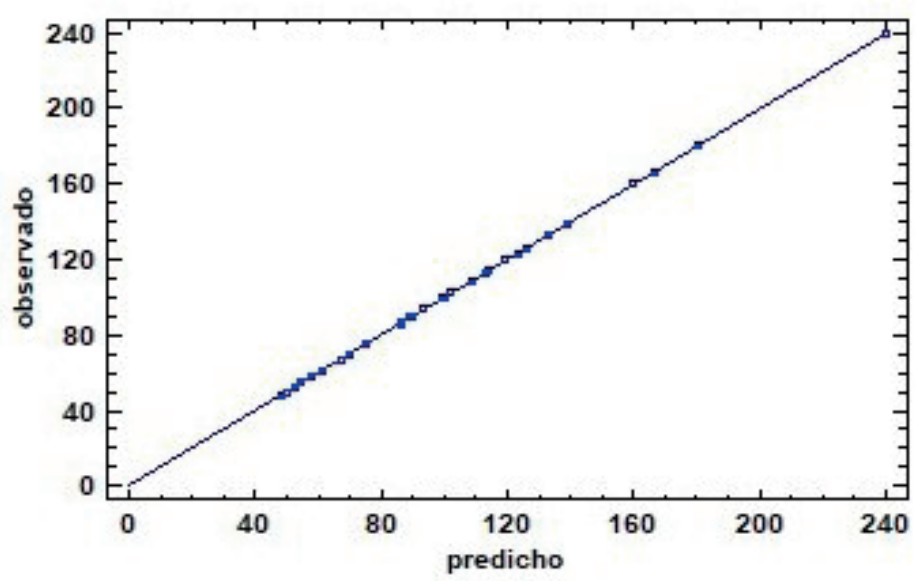


Figura 2. Gráfico de precio pagado a productores

Regresión lineal múltiple para precio en bolsa café colombiano

La variable "precio en bolsa café colombiano" se contrastó con las variables predictoras año, producción total (miles de sacos), consumo doméstico (miles de sacos), existencias iniciales brutas, exportaciones de todas las formas y precio pagado a productores (US), respectivamente.

Al realizar el análisis del modelo de regresión lineal múltiple con base en el método Forward se encontró que las variables de mayor representatividad sobre el precio en bolsa del café colombiano son el precio pagado a productores (US) y la diferencia entre precios en bolsa del café colombiano son el precio pagado a los proveedores; así como la diferencia entre precios (Tabla 4), siendo ambas altamente significativas.

Tabla 4.
Variables representativas del modelo

Parámetro	Estimación	Error estándar	Estadístico T	Valor-P
CONSTANTE	-0,00157563	0,0015622	-1,00859	0,3221

Parámetro	Estimación	Error estándar	Estadístico T	Valor-P
Precio pagado a productores (US)	1,00002	0,0000142136	70356,7	0,0000**
Diferencia entre precios	0,999969	0,000043722	22871,1	0,0000**

** Efecto altamente significativo

Fuente: autores (2022).

A su vez, al realizar el respectivo análisis de varianza (Tabla 5), se aprecia que el modelo es altamente significativo (valor p = 0,0000).

Tabla 5.

Análisis de varianza para precio pagado a productores

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	77315,7	2	38657,8	4585271260,46	0,0000**
Residuo	0,000227634	27	0,00000843087		
Total (Corr.)	77315,7	29			

** Efecto altamente significativo

Fuente: autores (2022).

Es de resaltar, además, que el coeficiente de determinación R-cuadrado fue igual a 100 %, demostrándose que el precio en bolsa del café colombiano depende esencialmente de las variables de precio pagado a productores y la respectiva diferencia entre precios y cuyo modelo de regresión es:

*Precio en bolsa café colombiano = -0,00157563 + 1,00002*Precio pagado a productores (US) + 0,999969*Diferencia entre precios*

Al realizar el análisis entre los valores observados (datos históricos) y los predichos (generados por el modelo de regresión al remplazar los valores de las variables predictoras en la ecuación) se observa una alta bondad de ajuste que ratifica la idoneidad del modelo (Figura 3).

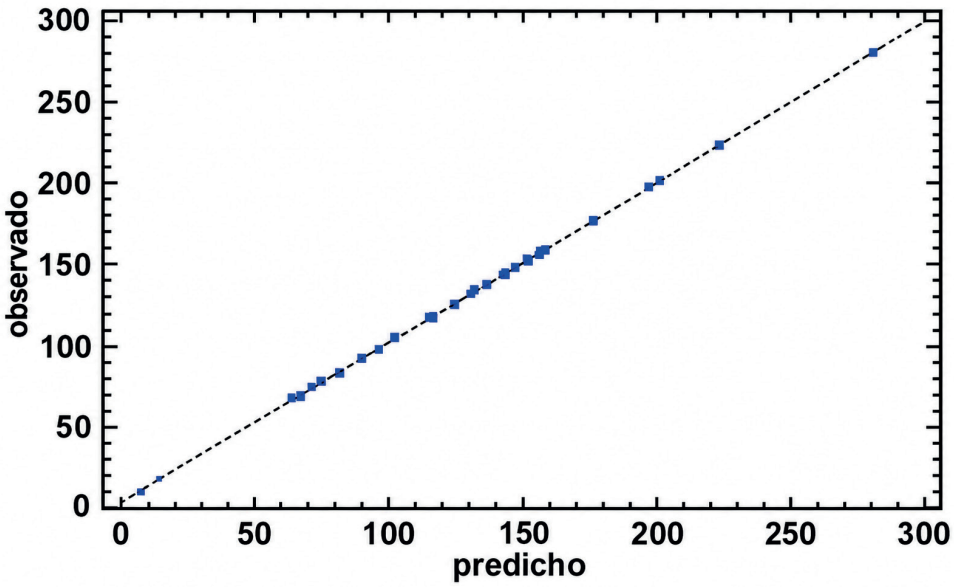


Figura 3. Gráfico de precio en bolsa de café colombiano

Al realizar un ejercicio reflexivo de ambos modelos de regresión lineales múltiples, se corrobora lo mencionado por autores como Sen (1967), Rao (1975), Chand y Raju (2009), FAO (2021), Novanda et al. (2018) y Consuegra y Garcia-Verdugo (2017), así como por Bacci et al. (2019), Milas, Otero y Panagidiotis (2004), Naveena (2015) y Naveena et al. (2017), quienes destacan la bondad de ajuste de los modelos estocásticos en el ámbito agrícola. Sin embargo, la contribución distintiva de este trabajo radica en la aplicación sistemática de modelos no lineales simples y múltiples para variables específicas del café colombiano, lo que permite cuantificar con precisión relaciones que estudios previos habían abordado principalmente desde enfoques lineales o genéricos.

Además, este estudio evidencia metodológicamente que, en el contexto colombiano, el precio pagado al productor no solo se correlaciona con el precio en bolsa de Nueva York, sino que depende funcional y casi determinantemente de este y de la diferencia entre ambos precios, con un ajuste del 100 % en los modelos múltiples. Esto no solo valida hipótesis anteriores, sino que proporciona un marco cuantitativo robusto para la planificación estratégica de la agroindustria cafetera local, destacando la importancia de modelar explícitamente la no linealidad y las interacciones entre variables, lo cual puede orientar políticas de estabilidad de precios y mitigación de riesgos para los productores.

4 CONCLUSIONES

Con base en los análisis en el presente estudio se puede concluir que:

- Los modelos de regresión simple no lineal desarrollados para variables como el consumo doméstico, las existencias iniciales brutas, el precio pagado a productores y el precio en bolsa de Nueva York resultaron estadísticamente significativos ($p<0.01$), lo que valida su utilidad para realizar pronósticos temporales de estas variables en el sector cafetero colombiano.
- Por el contrario, los modelos de regresión simple para la producción total y las exportaciones de café no fueron estadísticamente significativos, lo que sugiere que estas variables presentan una alta volatilidad y están influenciadas por factores no capturados por el tiempo, como condiciones climáticas, dinámicas de mercado global y competencia internacional.
- Los modelos de regresión múltiple demostraron que el precio pagado a los productores puede explicarse casi en su totalidad (R^2 aproximado al 100 %) por el precio en bolsa del café colombiano y la diferencia entre ambos precios. De igual forma, el precio en bolsa se explica principalmente por el precio al productor y dicha diferencia, confirmando una relación estructural fuerte entre estas variables.
- Desde una perspectiva contextual, se corrobora que en el mercado cafetero colombiano el precio al productor está funcionalmente determinado por el precio de referencia en la bolsa de Nueva York, lo que resalta la importancia de este indicador externo para la planificación estratégica y la toma de decisiones en la agroindustria cafetera local.

CONTRIBUCIÓN DE LA AUTORÍA

Autor 1: investigación, conceptualización, análisis de datos, escritura, revisión y edición.

Autor 2: metodología, investigación, análisis de datos, conceptualización, escritura, borrador original.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la doctora Bibiana Vélez Medina, rectora delegataria y a la doctora María Angélica Ortiz Salazar, líder de investigaciones de la Universidad La Gran Colombia, por siempre animarnos a investigar y promover la cultura investigativa en los estudiantes de nuestra universidad.

Asimismo, deseamos rendir un sentido homenaje póstumo a Luis Alfonso Giraldo

González, quien fuera un gran conocedor y amante del café y que, a su vez, fue pieza esencial del desarrollo cafetero de Buenavista, Quindío (Colombia).

FINANCIAMIENTO

El presente trabajo hace parte del proyecto "Establecimiento de factores de sostenibilidad para la agroindustria de cafés de origen del departamento del Quindío" financiado por la Universidad La Gran Colombia, Sede Armenia, para la vigencia 2024.

USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Fue utilizada la inteligencia artificial en la generación del resumen gráfico, a través de la plataforma Gemini.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

LITERATURA CITADA

cAngelsen, A. & Kaimowitz, D. (Eds.), (2001). *Agricultural Technologies and Tropical Deforestation*. CABi.

Ayalew, B. & Sekar, I. (2016). Trends and regional disparity of maize production. *India. J. Development and Agricultural Economics, 8*(9), 193-199. https://www.researchgate.net/publication/308741013_Trends_and_regional_disparity_of_maize_production_in_India

Ayyanathan, N. & Kannammal, A. (2014). Share price time series forecasting for effective supply chain information exchange. I*nternational Journal of Logistics Systems and Management*, 18(1), 139-158. https://doi.org/10.1504/IJLSM.2014.062125

Azadi, H., Ho, P. & Hasfiati, L. (2011). Agricultural land conversion drivers: a comparison between less developed, developing and developed countries. *Land Degradation & Development, 22*(6), 596-604. https://www.researchgate.net/publication/227698151_Agricultural_land_conversion_drivers_A_comparison_between_less_developed_developing_and_developed_countries

Bacci L. A., Mello L. G., Incerti T., Paiva A. P. & Balestrassi P. P. (2019). Optimization of combined time series methods to

forecast the demand for coffee in Brazil: A new approach using Normal Boundary Intersection coupled with mixture designs of experiments and rotated factor scores. *International Journal of Production Economics*, 212, 186-211. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925527319300878

Chand, R. & Raju, S. S. (2009). Instability in Indian agriculture during different phases of technology and policy. *Indian Journal of Agricultural Economics, 64*(2), 188-207.

Consuegra M. & Garcia-Verdugo J. (2017). Measuring the functional efficiency ofagricultural futures markets. *Australian Agricultural and Resource Economics Society*, *61*(2), 232-46.

Cuaresma, C. J., Hlouskova, J. & Obersteiner, M. (2018). Fundamentals, speculation or macroeconomic conditions? Modeling and forecasting Arabica coffee prices. *European Review of Agricultural Economics, 45*, 583-615.

Deb, U. & Soumitra, P. (2015). Groundnut production performance in Bangladesh: a district level analysis. *Economic Affairs, 60*(3), 391-400.

El-Rasoul, A. A. E. Y., Shehab, S. M. H. & Maghraby, H. E. S. (2020). Trends and Decomposition Growth Analysis of the Most Important Cereal Crops in Egypt. MPRA Paper No. 100231. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://mpra.ub.uni-muenchen.de/100231/8/MPRA_paper_100231.pdf

Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO]. (2015). Climate Change and Food Security: Risks and Responses. http://www.fao.org/3/i5188e/i5188e.pdf.

Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO]. (2021). The Impact of Disasters and Crises on Agriculture and Food Security. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/30c0d98d-1c21-48ef-b5d9-8d988e6fa6f2/content

Federación de Cafeteros de Colombia [FCC]. 2021. https://federaciondecafeteros.org/wp/listado-noticias/cafe-crece-214-en-primer-trimestre-y-jalona-pib-agropecuario-de-33/#:~:text=Bogot%C3%A1%2C%20mayo%2018%20de%202021,agropecuario%20de%203%2C3%25

Fousekis, P. (2017). Price co-movement and the hedger's value-at-risk in the futures markets for coffee. *Agricultural Economics Review, 18*, 35-47.

Hemant, S. (2015). Growth and instability of wheat production in Rajasthan. *Indian Journal of Economics and Development, 11*(4), 945-950. https://www.researchgate.net/publication/283478760_Growth_and_instability_of_wheat_production_in_Rajasthan

Ikuemonisan, E. S., Mafimisebi, T. E., Ajibefun, I. & Adenegan, K. (2020). Cassava production in Nigeria: trends, instability and decomposition analysis (1970-2018). *Heliyon, 6*(10), e05089. https://www.

sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844020319320

Laurance, W. F., Sayer, J. & Cassman, K. G. (2014). *Agricultural expansion and its impacts on tropical nature. Trends in Ecology & Evolution*, 29(2), 107-116. https://www.researchgate.net/publication/259586244_Agricultural_expansion_and_its_impacts_on_tropical_nature

Mahir, M. E. & Abdelaziz, H. H. (2011). Analysis of agricultural production instability in the Gezira scheme. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, 10*(2), 53-58. https://www.researchgate.net/publication/271882478_Analysis_of_agricultural_production_instability_in_the_Gezira_scheme

Milas C., Otero J. & Panagiotidis, T. (2004). Forecasting the spot spices of various coffee types using linear and non-linear error correction models. *International Journal of Finance and Economics, 9*, 227-88.

Ministerio de Agricultura de Colombia [MAC]. (2021). https://www.minagricultura.gov.co/noticias/Paginas/El-sector-agropecuario-creci%C3%B3-3,8-en-el-PIB-del-segundo-trimestre-de-2021.aspx

Narain, D. (1977). Growth of productivity in Indian agriculture. *Indian Society of Agricultural Economics, 32*(01), 1-44.

Naveena K. (2017). Statistical modelling for forecasting of price and export of Indian coffee Doctoral dissertation. India: Institute of Agricultural Sciences, Banaras Hindu University; 2015. [8] Naveena K, Singh S, Singh A. Hybrid time series modelling for forecasting the price of washed coffee (Arabica Plantation Coffee) in India. *International Journal of Agriculture Sciences*, *9*(10), 4004-7.

Naveena K., Singh Subedar, Rathod Santosha, Singh Abhishek. (2017). Hybrid ARIMA-ANN modelling for forecasting the price of Robusta coffee in India. I*nternational Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 6(7), 1721-6.

Novanda R. R., Sumartono E., Asriani P. S., Yuliarti E., Sukiyono K., Priyono B. S., Irnad, Reswita, Suryanty, M. & Octalia, V. (2018). A comparison of various forecasting techniques for coffee prices. *Journal of Physics.: Conf. Ser.* 1114:012119. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1114/1/012119

Organización Internacional del Café [OIC]. (2020). *Coffee Market Report.* http://dev.ico.org/show_news.asp?id=747

Pretty, J. & Bharucha, Z. P. (2014). Sustainable intensification in agricultural systems. *Annals of Botany, 114*(8), 1571-1596. https://academic.oup.com/aob/article-abstract/114/8/1571/210078?redirectedFrom=fulltext

Rao, C. H. (1975). Technological Change and Distribution of Gains in Indian Agriculture. Institute of Economic Growth. The Macmillan Co.

Sadiq, M. S., Singh, I. P. & Ahmad, M. M. (2020). A paradigm shift from area-led to productivity-led production of maize in Nigeria. *Journal of Agriculture and Environmental Sciences, 5*(2). https://doi.org/10.20372/jaes.v5i2.451

Sen, S. R. (1967). Growth and Instability in Indian Agriculture. Address to the 20th Annual Conference of the Indian Society of Agricultural Statistics, http://isas.org.in/jisas/volume/1-%2520GROWTH%2520AND%2520INSTABILITY%2520IN%2520INDIAN.pdf

Swain, M. (2014). Sources of growth and instability in agricultural production in western Odisha, India. *Asian Journal of Agricultural Development, 11*(2), 51-70. https://ajad.searca.org/article?p=467

Yashavanth B. S., Singh K. N., Paul A. & Paul R. K. (2017). Forecasting prices of coffee seeds using Vector Autoregressive Time Series Model. *Indian Journal of Agricultural Science, 87*(6), 754-8. https://epubs.icar.org.in/index.php/IJAgS/article/view/70960

Conflicto de intereses
Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Licencia de Creative Commons
Revista de Investigación Agraria y Ambiental is licensed under a Creative Commons Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual 4.0 Internacional License.

Fecha de recibido: 21-08-2025
Fecha de aceptado: 01-12-2025
DOI: 10.22490/21456453.10142

ANÁLISIS DEL POTENCIAL DE LAS EXCRETAS PORCINAS, COMO ABONO ORGÁNICO EN LA PRODUCCIÓN DE PLÁNTULAS DE *Theobroma cacao*

ANALYSIS OF THE POTENTIAL OF SWINE EXCRETA AS ORGANIC FERTILIZER IN THE PRODUCTION OF *Theobroma cacao* SEEDLINGS

Fredy Cuéllar-Yustres[1]
Manuel Francisco Polanco-Puerta[2]

Citación: Cuéllar-Yustres y Polanco-Puerta. (2026). Análisis del potencial de las excretas porcinas, como abono orgánico en la producción de plántulas de Theobroma cacao. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental, 17*(2), 159-179.
https://doi.org/10.22490/21456453.10142

[1]Ingeniero Industrial, Especialista en Gerencia Logística y Cadenas de Suministros. Universidad de Manizales, maestrando en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente.
fredycuellaryustres@gmail.com

[2]Ph. D. en Desarrollo Sostenible: Economía, Sociedad y Medio Ambiente. Universidad de Manizales.
mpolanco@umanizales.edu.co

RESUMEN

Contextualización: El municipio de Tesalia, se encuentra ubicado al occidente del departamento del Huila, en Colombia; allí se destacan el ganado porcino (*Sus scrofa domesticus*), vacuno (*Bos taurus*) y cultivos como el cacao (*Theobroma cacao*) y el café (*Coffea arabica*), todos con un alto potencial agroecológico.

Vacío de conocimiento: Aunque existe un desarrollo económico, este no es sostenible, lo cual se evidencia en el desconocimiento de los productores cacaoteros y porcícolas, cuyas actividades generan contaminación en los suelos en diferentes veredas del municipio,

Propósito: El objetivo de esta investigación fue analizar el potencial de las excretas porcinas y de los residuos de poscosecha de *Theobroma cacao* en la elaboración de abono orgánico para la nutrición de plántulas del cultivo de cacao en el municipio de Tesalia, Huila.

Metodología: Mediante un proceso de compostaje se elaboraron mezclas con distintas proporciones de porcinaza y residuos de cacao, conformando cuatro tratamientos experimentales con tres repeticiones cada uno. Se caracterizó el abono compostado a través de análisis fisicoquímicos y se evaluaron variables morfofisiológicas en 144 plántulas, tales como altura, número de hojas, diámetro del tallo, y peso fresco y seco de la parte aérea y radicular.

Resultados y conclusiones: Los resultados mostraron diferencias significativas entre tratamientos, destacándose el T4 (75 % excretas porcinas y 25 % residuos de cacao), por su mayor aporte nutricional y mejor desempeño en el crecimiento vegetal. Adicionalmente, el análisis económico evidenció que el costo de producción del abono orgánico y de las plántulas es competitivo frente a fertilizantes comerciales, representando una alternativa viable para pequeños productores. El compost obtenido cumple con parámetros establecidos en la normativa nacional para fertilizantes orgánicos, fortaleciendo su potencial de escalamiento como insumo agroecológico y de negocio verde. Este estudio resalta la importancia de integrar prácticas agroecológicas y de economía circular en territorios con vocación agrícola y pecuaria, promoviendo el aprovechamiento eficiente de residuos, la reducción de impactos ambientales negativos y la mejora en la productividad cacaotera. Asimismo, contribuye al cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible, en particular el ODS 12 (Producción y consumo responsables) y el ODS 13 (Acción por el clima).

Palabras clave: abono orgánico, almácigo, compostaje, porcinaza, sostenibilidad.

ABSTRACT

Contextualization: The municipality of Tesalia, Huila, is located in the western part of the department, Colombia; within this area, pigs (Sus scrofa domesticus), cattle (Bos taurus) and crops such as cocoa (Theobroma cacao) and coffee (Coffea arabica) stand out. All with high agroecological potential.

Knowledge gap: Although there is economic development, it is not sustainable, as evidenced by the lack of knowledge among cocoa and pork producers, whose activities generate soil contamination in different areas of the municipality,

Objective: To analyze the potential of swine excreta and post-harvest residues of Theobroma cacao in the preparation of organic fertilizer for the nutrition of cacao seedlings in the municipality of Tesalia, Huila.

Methodology: By means of a composting process, mixtures were prepared with different proportions of swine manure and cocoa residues, forming four experimental treatments with three replicates each. The composted fertilizer was characterized through physicochemical analysis, and morphophysiological variables were evaluated in 144 seedlings, such as height, number of leaves, stem diameter, and fresh and dry weight of the aerial and root parts.

Results and conclusions: The results showed significant differences among the treatments, with T4 (75% swine excreta and 25% cocoa waste) standing out for its higher nutritional contribution and better performance in plant growth. In addition, the economic analysis showed that the production cost of organic fertilizer and seedlings is competitive with commercial fertilizers, representing a viable alternative for small producers. The compost obtained complies with the parameters established in the national regulations for organic fertilizers, strengthening its potential for scaling up as an agroecological and green business input. This study highlights the importance of integrating agroecological and circular economy practices in territories suitable for agricultural and livestock activities, promoting the efficient use of waste, reducing negative environmental impacts and improving cocoa productivity. It also contributes to the achievement of the Sustainable Development Goals, in particular SDG 12 (Responsible Consumption and Production) and SDG 13 (Climate Action).

Keywords: organic fertilizer, seedbeds, composting, pig manure, sustainability.

RESUMEN GRÁFICO



1 INTRODUCCIÓN

El cultivo de *Theobroma cacao* constituye una de las actividades agrícolas de mayor importancia socioeconómica en Colombia, no solo por su aporte a la seguridad alimentaria y la generación de ingresos para pequeños productores, sino también por su potencial en mercados internacionales que reconocen la calidad del cacao fino de aroma. El departamento del Huila ocupa el quinto lugar en producción nacional, con aproximadamente 4.192 toneladas anuales en 12.300 hectáreas cultivadas, lo que representa cerca del 8 % de la producción total del país (MinAgricultura, 2021). El municipio de Tesalia, localizado al occidente del Huila, cuenta con condiciones agroecológicas favorables, tanto para la producción de cacao como para la porcicultura, lo que abre oportunidades para la articulación de ambas actividades en un modelo productivo sostenible.

No obstante, el cacao enfrenta limitaciones crecientes asociadas al cambio climático y a la degradación de los suelos, factores que inciden negativamente en el rendimiento y la calidad del grano (Tapia Jara, 2021). Paralelamente, la actividad porcina genera grandes volúmenes de excretas que, al no ser manejadas adecuadamente, ocasionan impactos ambientales como malos olores, contaminación de fuentes hídricas y emisiones de gases de efecto invernadero (FAO, 2015; Lobato Calderón, 2023). Esta dualidad plantea la necesidad de enfoques integrados que conviertan los residuos en recursos productivos, bajo esquemas de economía circular y agroecología.

En este contexto, el aprovechamiento de excretas porcinas y residuos de poscosecha de cacao mediante procesos de compostaje se perfila como una alternativa estratégica para mejorar la nutrición de plántulas en viveros, reducir la dependencia de fertilizantes químicos y mitigar los impactos ambientales. El presente estudio se enmarca en las políticas nacionales e internacionales de sostenibilidad, como la "Resolución 150 de 2003 del ICA", Instituto Colombiano Agropecuario, que regula los fertilizantes y acondicionadores de suelos, y los objetivos de desarrollo sostenible (ODS), en especial el ODS 12 (Producción y consumo responsables) y el ODS 13 (Acción por el clima).

De este modo, se busca no solo evaluar el desempeño agronómico del abono orgánico obtenido, sino también ofrecer lineamientos técnicos y económicos que fortalezcan los sistemas productivos locales y promuevan la generación de negocios verdes. Esta investigación se presenta, por tanto, como un aporte pertinente a la innovación agroecológica en la región, con impactos positivos para los productores de cacao y porcicultores, así como para la gestión sostenible de los recursos naturales.

El uso de abonos orgánicos ha cobrado relevancia en la agricultura sostenible como alternativa a los fertilizantes químicos, debido a sus beneficios sobre la fertilidad del suelo, la disponibilidad de nutrientes y la reducción de impactos ambientales (Román et al., 2013; Kastillo, 2022). Diversos estudios han demostrado que los residuos pecuarios, en particular las excretas porcinas, tienen un alto potencial como materia prima para la elaboración de compostajes ricos en nitrógeno, fósforo, potasio y micronutrientes esenciales (Borges-Gómez et al., 2003). El compostaje de excretas, cuando se combina con residuos agrícolas como los de poscosecha de cacao, permite obtener un sustrato equilibrado que mejora el desarrollo de plántulas en viveros, optimizando variables como altura, número de hojas y biomasa (Rada Mallqui, 2023).

Desde la perspectiva agroecológica, estas prácticas buscan mejorar la productividad, regenerando los ecosistemas y fortaleciendo la resiliencia de los sistemas agroalimentarios (León Sicard, 2021; Schnitman, 2015). Asimismo, se enmarcan en los principios de la economía circular, al promover el aprovechamiento eficiente de los residuos y la reducción de la dependencia de insumos externos (McDonough & Braungart, 2005; Raworth, 2018).

En Colombia, la normativa reconoce la importancia de regular la producción y uso de insumos agrícolas sostenibles. Inicialmente, la Resolución 150 de 2003 del ICA (ICA, 2003) estableció los requisitos para la producción y comercialización de fertilizantes y acondicionadores de suelos. Posteriormente, la Resolución 068370 de 2020 del ICA (ICA, 2020) definió los criterios para la clasificación, producción y registro de bioinsumos, entre los cuales se incluyen biofertilizantes, bioestimulantes y otros productos de origen biológico u orgánico. Esta resolución impulsa la transición hacia prácticas agrícolas más sostenibles, garantizando la calidad, seguridad y eficacia de los insumos, así como su articulación con la política nacional de negocios verdes y los objetivos de desarrollo sostenible.

En este contexto, el compost elaborado a partir de excretas porcinas y residuos de cacao se enmarca en la categoría de bioinsumos orgánicos, con potencial para ser registrado y escalado conforme a la normatividad vigente del Instituto Colombiano Agropecuario (ICA). Este tipo de insumo no solo garantiza validez técnica y legal, sino que también fomenta su adopción entre pequeños productores al fortalecer la sostenibilidad de los sistemas agroproductivos mediante el aprovechamiento responsable de los residuos porcinos.

El uso de fertilizantes orgánicos en la agricultura sostenible ha sido ampliamente promovido por diversos autores, quienes destacan su aporte a la salud del suelo y a la reducción de riesgos ambientales y sanitarios asociados al uso de fertilizantes químicos (Kastillo, 2022). De igual manera, Borges-Gómez et al. (2003) demostraron que las excretas porcinas, combinadas con residuos agrícolas, mejoran la disponibilidad de macroelementos y favorecen el desarrollo de plántulas. En el caso del cacao, estudios como el de Rada Mallqui (2023) han evidenciado incrementos en variables de crecimiento —altura, número de hojas y biomasa— mediante la aplicación de biofertilizantes orgánicos durante la fase de vivero.

Estas estrategias fortalecen la sostenibilidad productiva y se alinean con los modelos de economía regenerativa y "de la cuna a la cuna" propuestos por McDonough & Braungart (2005) y por Raworth (2018). En este sentido, la transformación de las excretas porcinas en compost representa una alternativa técnica viable para reducir la dependencia de insumos sintéticos y avanzar hacia sistemas agroproductivos más sostenibles. Como se observa en la presente investigación, se desea dar un segundo uso productivo a las excretas porcinas, cambiando estas de residuo a fertilizante orgánico aplicado a las plántulas de cacao, en las cuales se evalúa su crecimiento.

El objetivo de esta investigación fue analizar el potencial de las excretas porcinas y de los residuos de poscosecha de Theobroma cacao en la elaboración de abono orgánico para la nutrición de plántulas del cultivo de cacao en el municipio de Tesalia, Huila. Este análisis busca realizar la caracterización fisicoquímica del abono orgánico obtenido del compostaje del estiércol del ganado porcino junto con los residuos de cosecha, así como evaluar el efecto de las mezclas de las excre-

tas derivadas del ganado porcino y los residuos de cosecha y del cacao en la elaboración de un abono compostado para fertilizar plántulas de cacao en su fase de almácigo. A través de este trabajo, se pretende potenciar estrategias para la producción agroecológica de plántulas de cacao, en su fase de almácigo sobre el área de estudio.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio: La investigación se desarrolló en el municipio de Tesalia, departamento del Huila, Colombia, ubicado en las coordenadas geográficas 2°30›3.63»N y longitud 75°44'56.15" O (WGS84). El área corresponde a un entorno rural con condiciones agroecológicas favorables para el cultivo de *Theobroma cacao* y la producción porcina. Presenta temperaturas promedio entre 22 °C y 30 °C, humedad relativa entre el 70 % y el 80 %, en una altitud de aproximadamente 1071 m s. n. m., con disponibilidad de fuentes se agua y sombra natural.

Materia vegetal: Se emplearon plántulas de cacao clon IMC 67, variedad reconocida por su vigor y adaptabilidad, ampliamente utilizada en viveros de la región. Las plántulas fueron obtenidas a partir de semilla certificada adquirida en viveros locales avalados por Fedecacao. El material correspondía a plántulas recién germinadas (10 días de emergencia), trasplantadas a bolsas de polietileno de 14 x 28 cm para su etapa de almácigo. Durante el ensayo se realizaron labores culturales uniformes: riego diario en la mañana, control manual de malezas y protección física con polisombra al 50 %. No se aplicaron fertilizantes químicos complementarios, con el fin de evaluar únicamente el efecto del compost en estudio.

Diseño experimental: Se utilizó un diseño de bloques completamente al azar (BCA) con cuatro tratamientos y tres repeticiones. Cada repetición estuvo conformada por 12 plántulas, para un total de 144 unidades experimentales (4 tratamientos × 3 repeticiones × 12 plántulas).

- **Tratamiento control (T0):** mezcla de suelo agrícola con abono orgánico comercial tipo *bocashi*, empleada en la zona por los productores.
- **Tratamientos experimentales (T1–T4):** compost elaborado con distintas proporciones de excretas porcinas y residuos de cacao.

La elección de los porcentajes respondió a ensayos previos reportados en la literatura (Borges-Gómez et al., 2003; Rada Mallqui, 2023) y a criterios de disponibilidad de materia prima en el área de estudio, buscando representar escenarios desde la exclusividad de residuos de cacao hasta la predominancia de excretas porcinas. Lo cual se observa en la siguiente tabla:

Tabla 1.

Diseño experimental y distribución de los tratamientos

Tratamiento	Residuos de cacao (%)	Excretas porcinas (%)	Justificación
T1	100	0	Control con solo residuos de cacao.
T2	75	25	Proporción baja de porcinaza para enriquecer el sustrato.
T3	50	50	Proporción balanceada de ambos residuos.
T4	25	75	Mayor carga de porcinaza para evaluar respuesta a alta disponibilidad de N.

Fuente: autores.

Compostaje y análisis fisicoquímico: El compostaje se realizó en pilas estáticas con volteo manual semanal durante 60 días, controlando la humedad al 60 %. Una vez finalizado el proceso, se recolectaron muestras compuestas por tratamiento para su análisis en el Laboratorio de Suelos de la Universidad Corhuila.

Los parámetros evaluados y la norma técnica Icontec aplicada se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 2.

Norma técnica aplicada

Parámetro	Norma técnica aplicada (Icontec)
pH	NTC 5264:2023 – Determinación de pH en suelos
Conductividad eléctrica (CE)	NTC 5349:2016 – Bases cambiables, método acetato de amonio
Carbono orgánico total (COT)	NTC 5403:2021 – Determinación de carbono orgánico
Materia orgánica (MO)	Método Walkley & Black (Icontec, 2014)
Nitrógeno total	Método Kjeldahl – AOAC
Fósforo disponible	NTC 5350:2020 – Determinación de fósforo en suelos
Micronutrientes (Fe, Zn, Cu, Mn, B)	Métodos estándar de absorción atómica Icontec

Fuente: autores.

El análisis se realizó al finalizar el proceso de compostaje (día 60). No se efectuó análisis inicial de la materia prima, por lo que los resultados se interpretan de manera absoluta, comparando tratamientos.

Siembra y aplicación del compost: Las plántulas fueron trasplantadas en bolsas de polietileno de 14 x 28 cm, con un sustrato compuesto por 50 % de tierra negra y 50 % del abono (1 kg de cada componente). La inoculación del compost se hizo en el momento de la siembra, garantizando la homogeneidad del sustrato. No se realizaron aplicaciones adicionales durante los 90 días de evaluación. El manejo incluyó riego diario (200 ml por bolsa), control manual de malezas y cobertura ligera para evitar insolación directa.

Variables evaluadas: Durante 90 días se registraron cada 30 días las siguientes variables: altura de plántula (cm), número de hojas, diámetro de tallo (mm), peso fresco y seco de la parte aérea y de la raíz. Estas variables se seleccionaron porque permiten evaluar diferencias tempranas en la etapa de almácigo, donde el crecimiento inicial es crítico para el éxito en vivero, aun tratándose de un cultivo perenne. En cada periodo se muestrearon 12 plántulas por tratamiento, con tres repeticiones, para un total de 36 plántulas evaluadas por tratamiento.

Análisis estadístico: Los datos fueron procesados en RStudio. Se verificó la normalidad con Shapiro-Wilk, se realizó el análisis de varianza (ANOVA) y la comparación de medias con Tukey ($p < 0,05$). Asimismo, se aplicó un análisis de correlación de Pearson entre las variables morfofisiológicas y los parámetros fisicoquímicos del compost, con el fin de identificar relaciones directas entre la composición del abono y el desempeño de las plántulas.

Evaluación económica y proyección agroecológica: Se realizó un análisis económico comparativo entre el abono orgánico producido y el fertilizante comercial de uso frecuente en la zona. Además, se estimaron los costos unitarios de producción de plántulas bajo el esquema experimental y se evaluó el potencial de escalamiento como negocio verde en el marco de la Resolución 150 de 2003 del ICA. Finalmente, se formularon estrategias para la transferencia del conocimiento y la articulación con planes de desarrollo local y los objetivos de desarrollo sostenible (ODS).

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis fisicoquímico del compost: El compostaje de excretas porcinas y residuos de cacao generó abonos con características diferenciadas (Tabla 3). Se evidenciaron diferencias significativas ($p < 0,05$) entre tratamientos en pH, conductividad eléctrica, materia orgánica y nitrógeno total. El tratamiento T2 presentó los valores más altos de materia orgánica (25,83 %) y nitrógeno total (1,29 %), mientras que la mezcla con mayor proporción de excretas porcinas (T4) alcanzó un pH cercano a la neutralidad (7,58) y evidenció mayor estabilidad química. Estos resultados confirman que la composición inicial de los residuos y la proporción de porcinaza influyen directamente en la calidad final del compost.

Tabla 3.

Propiedades fisicoquímicas del compost en los tratamientos experimentales

Tratamiento	pH	Conductividad	COT %	M O	Nitrógeno %
1	8,83 [a]	2,810 [a]	14,67 [a]	25,29 [a]	1,26 [a]
2	8,77 [a]	2,230 [a]	14,99 [a]	25,83 [a]	1,29 [a]
3	8,36 [a]	1,944 [a]	14,73 [a]	25,40 [a]	1,27 [a]
4	7,58 [b]	1,416 [b]	8,02 [b]	13,82 [b]	0,69 [b]

Fuente: autores.

Los resultados de bases cambiables y micronutrientes (Tabla 4) mostraron aportes variables, según la proporción de residuos. El tratamiento con mayor proporción de excretas porcinas presentó las concentraciones más altas de hierro, cobre, zinc y manganeso, evidenciando una mayor riqueza mineral del compost. Aunque no se realizó una comparación con el análisis inicial de los residuos, la presencia de estos micronutrientes en niveles adecuados confirma el potencial del producto como insumo agroecológico.

Tabla 4.

Contenido mineral del compost por tratamiento

Tratamiento	Potasio (ppm)	Fósforo (ppm)	Calcio (ppm)	Magnesio (ppm)	Azufre (ppm)	Sodio (ppm)	Boro (ppm)	Hierro (ppm)	Cobre (ppm)	Zinc (ppm)	Manganeso (ppm)
1	127,41	73,5	696,38	1984,8	790,31	377,2	44,67	57,2	3,88	44,74	62
2	155,38	72,9	898,78	1771,8	267,92	301,3	23,13	55,8	5,36	58,74	56,8
3	215,32	68,03	1106,8	1136,52	121,92	285,2	14,38	61,2	6,62	67,18	61
4	169,61	65,3	2748	1566,84	267,82	55,2	5,59	67	12,23	98,95	89,6

Fuente: autores.

Con respecto al análisis de composición física, los cuatro tratamientos presentaron una clase textural franco-arenosa.

Crecimiento de plántulas de cacao: Durante los 90 días de evaluación, las plántulas mostraron diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) en todas las variables medidas (altura, diámetro, número de hojas, peso fresco y seco). El tratamiento con menor porcentaje de residuos de cacao destacó con los valores más altos:

- Altura: 30,61 ± 1,2 cm
- Diámetro de tallo: 4,07 ± 0,3 mm
- Número de hojas: 12,58 ± 0,6
- Peso seco de raíz: 15,56 g

En contraste, T1 (100 % de residuos de cacao) presentó los valores más bajos en todas las variables.

La figura 1 muestra un incremento progresivo de la altura de las plántulas en todos los tratamientos a medida que avanza el tiempo de muestreo, evidenciando un crecimiento continuo durante el periodo evaluado. Se observa que el tratamiento T4 alcanzó las mayores alturas al final del experimento, seguido por T3, T2 y T1, lo que sugiere una mayor eficacia de T4 para promover el crecimiento longitudinal de las plántulas. Asimismo, las diferencias entre tratamientos se hacen más evidentes en los últimos muestreos, indicando que el efecto de los tratamientos sobre la altura se intensifica con el tiempo. Estos resultados reflejan una respuesta diferencial de las plántulas a las condiciones evaluadas, favoreciendo particularmente el desarrollo vegetativo en T4.

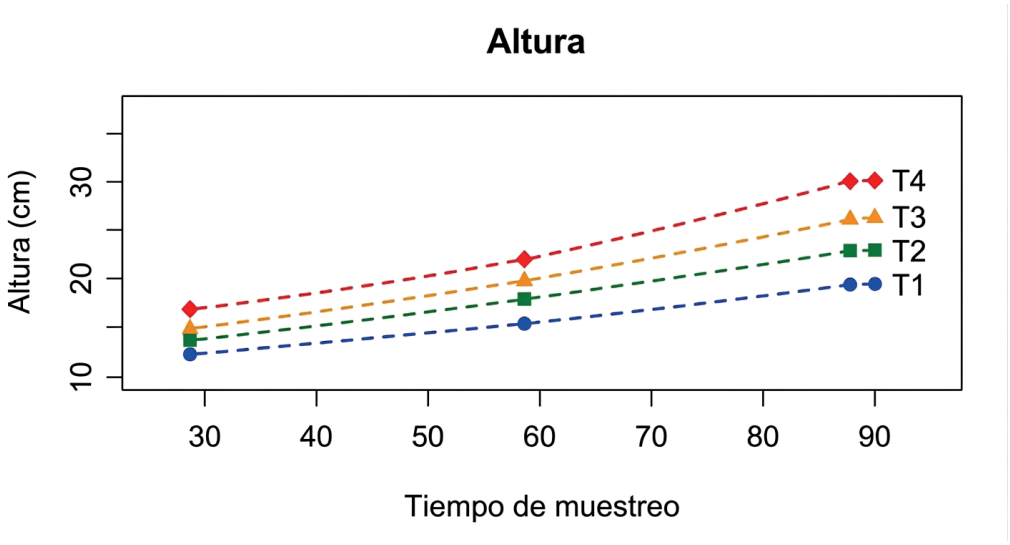


Figura 1. Crecimiento de las plántulas – Altura

Fuente: autores.

La figura 2 evidencia un aumento gradual del diámetro del tallo en todos los tratamientos durante el periodo de evaluación, lo que indica un adecuado desarrollo estructural de las plántulas. El tratamiento T4 presentó los mayores valores de diámetro en cada muestreo, seguido por T3, T2 y T1, manteniendo una tendencia consistente a lo largo del estudio. Las diferencias entre tratamientos se incrementaron con el tiempo, especialmente en la última medición, sugiriendo que los efectos de los tratamientos sobre el engrosamiento del tallo fueron acumulativos. Estos resultados indican que T4 favoreció de manera más eficiente el crecimiento radial de las plántulas, contribuyendo potencialmente a una mayor vigorosidad y estabilidad de las plantas.

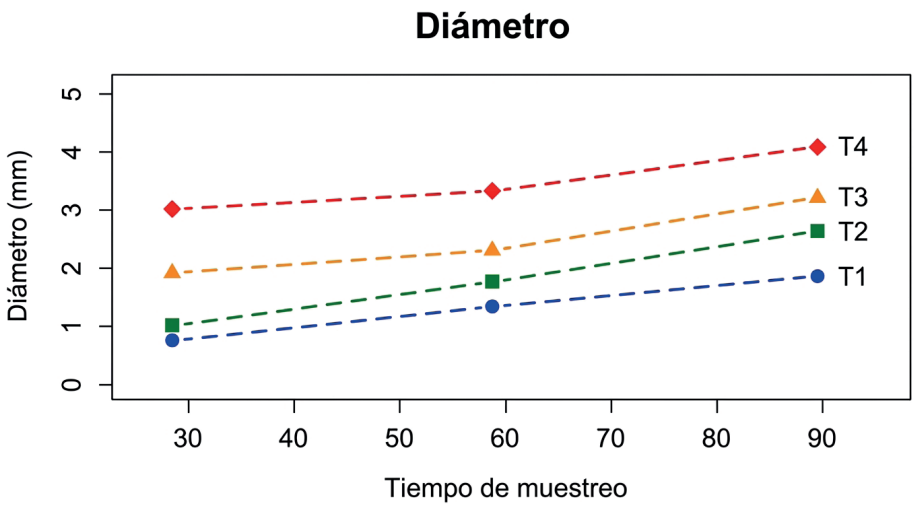


Figura 2. Crecimiento de las plántulas – Diámetro del tallo

Fuente: autores.

La figura 3 muestra un incremento sostenido en el número de hojas de las plántulas a lo largo del periodo de evaluación, lo que evidencia una adecuada expansión del área foliar y un crecimiento vegetativo activo. El tratamiento T4 registró consistentemente los valores más altos durante todos los muestreos, seguido por T3, T2 y T1. Las diferencias entre tratamientos fueron más notorias en la evaluación final, donde T4 presentó una mayor emisión de hojas respecto a los demás tratamientos. Estos resultados sugieren que el tratamiento T4 promovió de manera más eficiente el desarrollo foliar, favoreciendo potencialmente una mayor capacidad fotosintética y, por consiguiente, un mejor desempeño en el crecimiento de las plántulas.

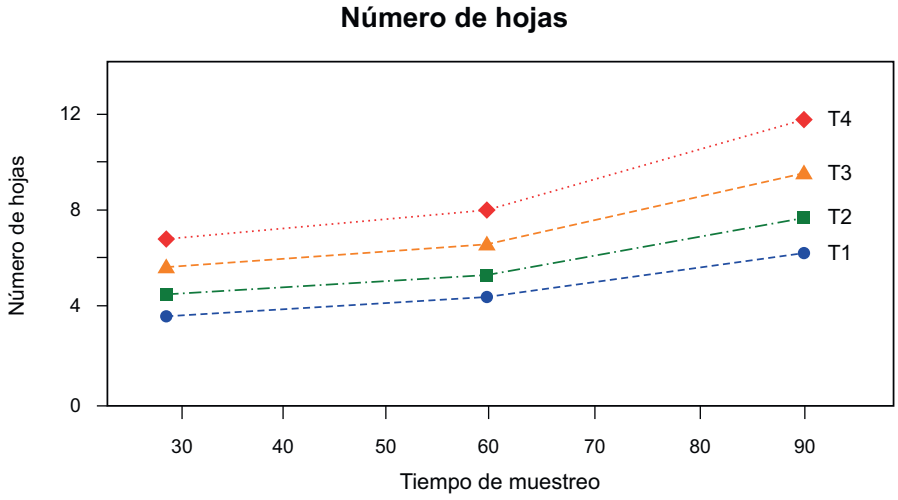


Figura 3. Crecimiento de las plántulas – Número de hojas

Fuente: autores.

El análisis de Tukey identificó cuatro grupos estadísticamente diferentes en cada variable evaluada, confirmando que el aumento de excretas porcinas en la mezcla favorece el desarrollo de las plántulas (Tabla 5).

Tabla 5.

Evaluación del crecimiento de las plántulas de cacao a 90 días. Prueba de Tukey

Tratamiento	Peso fresco de la parte aérea			Peso fresco de la raíz			Peso seco de la parte aérea			Peso seco de la raíz		
	P	G	N	P	G	N	P	G	N	P	G	N
T1	14,69	d	0,68	29,67	d	0,59	1,48	d	0,75	4,61	d	0,62
T2	19,64	c	0,70	39,06	c	0,75	2,09	c	0,69	5,92	c	0,62
T3	28,11	b	0,77	49,63	b	0,80	3,98	b	0,77	10,64	b	0,57
T4	21,42	a	0,85	60,97	a	0,68	6,08	a	0,62	15,56	a	0,76
Nota. P: Promedio, G: Grupo, N: Prueba de normalidad												

Fuente: autores.

Se realizó en RStudio primero el análisis de normalidad de datos, mediante el comando "shapiro.test", después de observar una distribución normal en los datos se hizo el análisis de correlación entre cada variable, mediante la función "Cor.test". Se analizó así en la tabla 6 que existe una correlación fuerte entre las variables sobre crecimiento de todos los tratamientos hechos, donde la correlación más fuerte es la relacionada con el diámetro de las plántulas y los pesos de la parte área y la raíz.

Tabla 6.

Análisis de correlación de Pearson entre las variables evaluadas

Variables	H	D	N	PFR	PFA	PSR	PSA
H	1	0,86	0,72	0,82	0,85	0,83	0,82
D		1	0,83	0,93(**)	0,96(**)	0,90	0,89
N			1	0,83	0,87	0,85	0,83
PFR				1	0,97(**)	0,93(**)	0,93(**)
PFA					1	0,97(**)	0,96(**)

Variables	H	D	N	PFR	PFA	PSR	PSA
PSR						1	0,99(**)
PSA							1

Nota. H: Altura, D: Diámetro del tallo, N: Número de hojas, PFR: Peso en fresco de la raíz, PFA: Peso en fresco de la parte aérea, PSR: Peso en seco de la raíz, PSA: Peso en seco de la parte aérea

Fuente: autores.

En general, los resultados de la tabla 6 evidencian correlaciones positivas y significativas entre las variables de crecimiento, lo que refleja una relación directa entre el desarrollo vegetativo y la acumulación de biomasa. Este comportamiento se asocia con la composición fisicoquímica del compost (Tablas 3 y 4), particularmente en los tratamientos con mayor equilibrio mineral (T3 y T4). Dicho balance nutricional favorece la síntesis de tejidos estructurales y explica el crecimiento vigoroso observado en las plántulas, a diferencia de los tratamientos con menor contenido de nutrientes, que mostraron un desarrollo más limitado.

Ahora bien, en la tabla 7 se pueden apreciar los lineamientos, mediante los cuales se observa el costo de plántula de cacao, al cabo de 90 días de trabajo, en el área de estudio:

Tabla 7.

Lineamientos económicos de la producción de plántulas de cacao

Ítem	Detalle	Unidad	Costo $
1	Germinación 144 semillas		
1.1	Adquisición de semillas	UND	20.000
1.2	Brote de semillas	UND	N/A
2	Siembra		
2.1	Tierra negra – 150 kilogramos	KG	150.000
2.2	Abono orgánico	UND	185.000
2.3	Bolsas para vivero – 144	UND	72.000
2.4	Mano de obra	UND	50.000
2.5	Seguimiento 90 días	UND	200.000
Total, producción de 144 plántulas de cacao en 90 días			677.000
Costo unitario por plántula producida			4701,38

Fuente: autores.

Como también en la producción del abono orgánico, el costo de elaboración de las plántulas de cacao se aproxima, estando este en un aproximado de $4.700 COP (US$ 1,22) por plántula, en su etapa de 90 días.

Potencial de escalamiento agroecológico: Según las estimaciones basadas en la disponibilidad anual de residuos en el municipio de Tesalia, es posible producir aproximadamente 10 toneladas de abono orgánico por año, con un potencial de remplazo parcial del fertilizante comercial. El tratamiento T4 mostró proporciones de sustitución efectivas para nutrientes como nitrógeno, calcio y magnesio, lo que refuerza su viabilidad como insumo agroecológico.

Como se aprecia en la tabla 8 el potencial del fertilizante para remplazar componentes del abono comercial utilizado en la región, es el denominado Permaxion triple 15, el cual tiene un costo de $ 3000 por kilo. De esa manera se observa cómo cada kilo de nitrógeno requerido se puede remplazar por 13,27 kilos del fertilizante orgánico, la proporción de 17,03 kilos de fertilizante orgánico por cada kilo de calcio requerido, la proporción de 8,12 kilos de fertilizante orgánico por cada kilo de magnesio a necesitar.

Tabla 8.

Análisis del potencial del fertilizante orgánico

Componentes %	Fertilizante comercial	Fertilizante orgánico compostado	
		Componente %	Proporción necesaria
N	15	1,13	13,27
P	15	0,007	2142,85
K	15	0,016	937,5
Ca	2,32	0,1362	17,03
Mg	1,3	0,16	8,125
Carbono orgánico	5	13,10	0,38

Fuente: autores.

Se observa de igual manera cómo a la alta presencia de carbono orgánico en el fertilizante hecho, solo se requiere una proporción de 0,38 kilos por cada kilo de fertilizante; caso contrario con los porcentajes de potasio y fósforo, los cuales presentan bajo porcentaje de participación.

Fertilizante orgánico realizado que, junto con la caracterización fisicoquímica realizada en el primer objetivo específico, da las bases para la producción de un negocio verde, el cual puedan aprovechar las comunidades presentes en el área de estudio. Donde permite así iniciar el cumplimiento de lo establecido en la resolución número 068370 del

27 de mayo de 2020, expedida por el ICA, donde se describen los requisitos para el registro de venta del fertilizante orgánico y sus respectivos anexos.

Análisis económico del abono y producción de plántulas: La producción de 160 kg de abono orgánico tuvo un costo total de $185.000 COP (US$ 48,04), con un costo unitario de $1156,25 COP (US$ 0,30) /kg. Este valor es competitivo frente a fertilizantes comerciales, y se obtuvo mediante recursos disponibles localmente. La producción de 144 plántulas en 90 días tuvo un costo aproximado de $4700 COP (US$ 1,22) por unidad, lo cual es económicamente viable dentro del sistema agroproductivo local. En la tabla 9 se presenta la relación de los costos de elaboración del abono compostado.

Tabla 9.

Lineamientos económicos de la producción de abono orgánico

Ítem	Detalle	Unidad	Costo $
1	Excretas porcinas		
1.1	Trasporte	UND	15.000
1.2	Almacenamiento	UND	20.000
2	Residuos de poscosecha del cacao		
2.1	Transporte	UND	20.000
2.2	Almacenamiento	UND	30.000
3	Abono orgánico		
3.1	Almacenamiento	UND	100.000
Total, elaboración de 160 Kg de abono orgánico en 3 meses			**185.000**
Costo unitario por kilogramo de abono orgánico producido			1156,25

Fuente: autores.

Como se cita en la teoría Cradle to Cradle, esta investigación da un nuevo uso a la excretas porcinas y residuos de poscosecha del cacao. Se cumple así un ciclo en el cual se crean cero desperdicios, donde se benefician directamente las familias que hacen parte de las asociaciones de porcicultores (Porcitesalia) y cacaoteros (Asocates), los cuales con el conocimiento adquirido tienen el potencial de mejorar sus necesidades básicas dentro de los límites de la naturaleza, ya que con el uso del fertilizante mitigan los efectos negativos de las excretas porcinas y esta actividad humana evita así daños irreversibles al medio ambiente, como se plantea en la teoría "Economía rosquilla: 7 maneras de pensar la economía del siglo XXI".

Discusión: Los resultados obtenidos confirman que la incorporación de excretas porcinas en el proceso de compostaje mejora significativamente la calidad del abono y el crecimiento inicial de plántulas de cacao. En particular, el tratamiento T4 (75 % excretas porcinas y 25 % residuos de cacao) mostró valores superiores en contenido de nutrientes y en variables de crecimiento, lo que coincide con estudios previos que resaltan la importancia de la relación C/N y el aporte de nitrógeno en la producción de compost de alta calidad (Román et al., 2013; Rada Mallqui, 2023).

El incremento en altura, diámetro del tallo y número de hojas en los tratamientos con mayor proporción de porcinaza puede atribuirse al aporte de nitrógeno y micronutrientes esenciales, que son fundamentales en la fase de vivero para garantizar plántulas vigorosas y con mejor capacidad de adaptación al trasplante (Borges-Gómez et al., 2003). De forma similar, Rada Mallqui (2023), en su ensayo con biol CNPK energético, demostró que formulaciones orgánicas adecuadas pueden superar el rendimiento de fertilizantes sintéticos en términos de peso radicular y biomasa seca. Este hallazgo resalta la relevancia de aprovechar residuos pecuarios en combinación con subproductos agrícolas, generando una sinergia que favorece la sostenibilidad productiva.

Por otro lado, la correlación positiva encontrada entre el diámetro del tallo y la biomasa seca respalda lo planteado por Núñez Rodríguez et al. (2020), quienes señalan que las variables morfométricas en etapas tempranas de cacao son buenos indicadores del éxito en la fase de establecimiento.

Sin embargo, el estudio presenta **limitaciones**. En primer lugar, no se realizó un análisis inicial de la materia prima, lo que impide determinar con exactitud el grado de transformación alcanzado durante el compostaje. Además, la investigación se desarrolló únicamente en condiciones de vivero, lo que restringe la extrapolación de los resultados a campo abierto, donde factores como plagas, variabilidad climática y suelos heterogéneos pueden modificar la respuesta de las plántulas.

A pesar de estas limitaciones, los hallazgos evidencian que el compost de excretas porcinas y residuos de cacao puede convertirse en una alternativa viable frente a fertilizantes químicos, en concordancia con las políticas públicas de promoción de bioinsumos en Colombia (ICA, 2020; MinAgricultura, 2021). El uso de estos insumos no solo contribuye a reducir costos de producción y dependencia de agroquímicos, sino que también fortalece la economía circular y la sostenibilidad ambiental en sistemas agroforestales de cacao.

Finalmente, se recomienda validar estos resultados en condiciones de campo y con periodos de evaluación más prolongados, que permitan observar el efecto del compost en etapas posteriores del cultivo. Asimismo, futuras investigaciones deberían explorar la combinación de este bioabono con otras prácticas agroecológicas, como la inoculación con micorrizas y bacterias promotoras de crecimiento, para potenciar aún más la productividad y resiliencia de los cacaotales.

En la tabla 10 se pueden observar las características fisicoquímicas del fertilizante orgánico aplicado a las plántulas de cacao.

Tabla 10.

Análisis fisicoquímico del fertilizante orgánico en discusión

MO	N	P2O5	K2O	CaO	MgO	S	B	Zn	Mn	Fe
%							(ppm)			
45	9	19	9	4	1	1	700	800	300	1200

Fuente: autores.

Desde el enfoque agroecológico, esta propuesta representa una estrategia alineada con los principios de sostenibilidad y economía circular. Se promueve el aprovechamiento integral de residuos agropecuarios, disminuyendo su impacto ambiental y generando valor agregado para pequeños productores. Además, se establece una sinergia entre la producción cacaotera y porcina local, lo cual fortalece los vínculos entre actores del territorio y fomenta la creación de cadenas productivas más resilientes.

La viabilidad económica del abono producido también refuerza su potencial como alternativa sustentable. Su costo de elaboración resulta competitivo frente a los productos sintéticos disponibles en el mercado regional. Asimismo, el uso de materias primas locales reduce la dependencia externa, incrementa la autonomía productiva de las comunidades rurales y contribuye a la seguridad alimentaria a largo plazo.

Finalmente, esta investigación se alinea con los objetivos de desarrollo sostenible (ODS), particularmente con el ODS 13 (Acción por el clima) y el ODS 12 (Producción y consumo responsables), al demostrar cómo el manejo adecuado de residuos orgánicos puede convertirse en una solución técnica, económica y ambientalmente viable para enfrentar los retos del cambio climático y la degradación del suelo.

4 CONCLUSIONES

El compost elaborado a partir de excretas porcinas y residuos de poscosecha de *Theobroma cacao* presentó propiedades fisicoquímicas adecuadas y una composición equilibrada de nutrientes esenciales —como calcio, magnesio, hierro, zinc y materia orgánica—, cumpliendo con los parámetros establecidos para abonos orgánicos.

Entre las formulaciones evaluadas, la mezcla con 75 % de excretas porcinas y 25 % de residuos de cacao se destacó por su eficiencia agronómica, al mejorar significativamente el crecimiento de las plántulas en todas las variables estudiadas. Además, su costo de producción resultó competitivo frente a los fertilizantes comerciales, lo que evidencia su viabilidad técnica y económica dentro de sistemas productivos locales.

En conjunto, los resultados demuestran que el aprovechamiento de residuos pecua-

rios y agrícolas mediante compostaje constituye una alternativa sostenible para la producción de plántulas de cacao. Esta práctica contribuye al cierre de ciclos de nutrientes, la reducción de impactos ambientales y el fortalecimiento de la economía rural, en coherencia con los principios de la economía circular y los objetivos de desarrollo sostenible.

CONTRIBUCIÓN DE LA AUTORÍA

Autor 1: investigación, logística, análisis de datos, conceptualización, redacción, borrador original, adquisición de recursos, administrador del proyecto,

Autor 2: investigación, metodología, conceptualización, análisis de datos, redacción, supervisión, revisión y edición.

AGRADECIMIENTOS

Se brinda un cordial agradecimiento a la Corporación Universitaria del Huila y la Universidad de Manizales, por la asesoría y acompañamiento prestados durante la ejecución del proyecto de investigación en los estudios de Maestría en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente.

FINANCIAMIENTO

Los estudios de Maestría en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente fueron financiados por las becas suministradas por la gobernación del Huila mediante el proyecto denominado “Formación de capital humano de alto nivel que fortalezca los sectores priorizados en la agenda regional de productividad y competitividad del departamento Huila”, con aprobación código BPIN 2021000100133.

USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

No aplica.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

LITERATURA CITADA

Borges-Gómez, L., Soria-Fregoso, M. y Ruz-Febles, N. (2003). Contenido de macronutrientes en sustratos de bagazo de henequén y excreta porcina y su efecto en el desarrollo de plántulas de papaya. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 9(1), 85-91. https://revistas.chapingo.mx/horticultura/revista/articulos/rchshIX191.pdf

Food and Agriculture Organization [FAO]. (2015). *Gleam Dashboard*. https://www.fao.org/gleam/dashboard/es/

Instituto Colombiano Agropecuario [ICA]. (2003, enero 21). *Resolución 150*. https://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?ruta=Resolucion/30042205

Instituto Colombiano Agropecuario ICA. (2024). *Informes y estadísticas agropecuarias*. https://www.ica.gov.co/areas/pecuaria/servicios/epidemiologia-veterinaria/censos-2016/censo-2018

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación [Icontec]. Icontec. (2014). *NTC 5264: Calidad del suelo – Determinación del pH*. https://tienda.icontec.org/gp-ntc-calidad-de-suelo-determinacion-del-ph-ntc5264-2023.html

Kastillo, J. (2022). *Guía ecológica: Fertilizantes orgánicos. La maravilla de cuidar el planeta. guía ecológica y agricultura sostenible.*

León Sicard, T. E. (2021). La estructura agroecológica principal de los agroecosistemas. Perspectivas teórico-prácticas. [Tesis doctoral.]. Universidad Nacional de Colombia. https://research.unipd.it/retrieve/e14fb26f-0f39-3de-1-e053-1705fe0ac030/LIbroEAP_Final_Publicado.pdf

Lobato Calderón, G. R. (2023). El compostaje como alternativa en la producción agrícola sostenible. *KANYÚ Revista Científica de Ciencias Agrarias*, *1*(1), 50-60. http://revistas.unaat.edu.pe/index.php/kanyu/article/view/50/52

McDonough, W., & Braungart, M. (2005). *Cradle to cradle*. McGraw-Hill Interamericana de España.

MinAgricultura. (2021, marzo). *Cifras sectoriales del cacao en Colombia*. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. https://sioc.minagricultura.gov.co/Cacao/Documentos/2021-03-31%20Cifras%20Sectoriales.pdf

Rada Mallqui, T. D. (2023). Aplicación de tres dosis de bio CNPK energético 9-19-9 en el crecimiento de plántulas de cacao (*Theobroma cacao L.*) Clon IMC 67 en Pucallpa [Tesis de maestría]. Universidad Nacional de Ucayali. https://repositorio.unu.edu.pe/items/58ec4f5e-7da9-4a1c-8587-a984743ca987

Raworth, K. (2018). *Economía rosquilla: 7 maneras de pensar la economía del siglo XXI*. Paidós.

Román, P., Martínez, M. y Pantoja, A. (2013). *Manual del compostaje del agricultor. Experiencias en América Latina*. FAO. https://www.fao.org/4/i3388s/i3388s.pdf

Schnitman, G. (Comp.). (2015). *El libro de la huerta*. Libsa

Tapia Jara, C. I. (2021). Evaluación del riesgo climático de la producción de cacao Fairtrade de Unocace, para plantear medidas de adaptación al cambio climático. *Tesis de grado*. Universidad Tecnológica Indoamérica. http://repositorio.uti.edu.ec//handle/123456789/2712

Conflicto de intereses
Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Licencia de Creative Commons
Revista de Investigación Agraria y Ambiental is licensed under a Creative Commons Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual 4.0 Internacional License.

Fecha de recibido: 10-07-2025
Fecha de aceptado: 27-10-2025
DOI: 10.22490/21456453.10039

COMPORTAMIENTO PRODUCTIVO DE CUYES (*Cavia porcellus*) SUPLEMENTADOS CON TORTA DE SEMILLA DE CHILACUÁN (*Vasconcellea pubescens*)

PRODUCTIVE BEHAVIOR OF GUINEA PIGS (*Cavia porcellus*) SUPPLEMENTED WITH CHILACUÁN (*Vasconcellea pubescens*) SEED CAKE

Elizabeth Lagos Burbano[1]
Ana Julia Mallama Goyes[2]
Ayda Paulina Dávila Solarte[3]
Lesvy Ramos Obando[4]
Rosa Lila Pereira Tupaz[5]

Citación: Lagos, E., Mallama, A.J., Dávila, A.P., Ramos-Obando, L. y Pereira, R.L. (2026). Comportamiento productivo de cuyes (Cavia porcellus) suplementados con torta de semilla de Chilacuán (Vasconcellea pubescens). *Revista de Investigación Agraria y Ambiental, 17*(2), 181-201. https://doi.org/10.22490/21456453.10039

[1] M.Sc. Universidad de Nariño, Pasto, Colombia. elizalagosb@udenar.edu.co
[2] M.Sc. Universidad de Nariño, Pasto, Colombia. anamallama@udenar.edu.co
[3] M.Sc. Universidad de Nariño, Pasto, Colombia. aidasolarte@yahoo.com
[4] M.Sc. Universidad de Nariño, Pasto, Colombia. lesvyramos@yahoo.com
[5] M.Sc. Universidad de Nariño, Pasto, Colombia. rosalipereira72@yahoo.com

RESUMEN

Contextualización: En Nariño, la crianza de cuyes es importante para la economía y seguridad alimentaria de las familias campesinas, y dado que la alimentación de esta especie representa del 60 % al 70 % de los costos de producción, es esencial buscar alternativas para mejorar la productividad.

Vacío de conocimiento: Se desconoce el efecto de la utilización de torta de semilla de chilacuán (*Vasconcellea pubescens*), como materia prima para la alimentación de cuyes, y su efecto en los parámetros productivos del animal.

Propósito: Se evaluó el efecto de incorporar torta de semilla de chilacuán (*Vasconcellea pubescens*) en suplementos en la dieta de cuyes (*Cavia porcellus*) y su influencia en los índices productivos.

Metodología: Se utilizaron 48 cuyes machos destetados. Los animales tuvieron una dieta de forraje y suplemento, este último se presentó en harina y se realizó con diferentes proporciones de inclusión de torta de chilacuán en relación con la torta de soya, lo que estableció los siguientes tratamientos: T0 (mezcla forrajera + Suplemento 1), T1 (mezcla forrajera + Suplemento 2) y T2 (mezcla forrajera + Suplemento 3). Se evaluó el contenido nutricional del forraje y los suplementos, así como la presencia de metabolitos en la torta de semilla de chilacuán. Los índices productivos evaluados fueron: consumo de materia seca del alimento balanceado (CAB), forraje (CF) y total (CT), ganancia diaria de peso (GDP), conversión alimenticia (CA) y rendimiento en canal (RC). Las diferencias se evaluaron mediante análisis de varianza y prueba de Duncan ($p < 0,05$).

Resultados y conclusiones: La torta de semilla de chilacuán mostró valores de 32,5 %, 36,5 % y 22,2 % de proteína, fibra y extracto etéreo, respectivamente, y la presencia de saponinas y compuestos fenólicos. En cuanto a los índices productivos, no se encontraron diferencias significativas para CF, CT, GDP y CA; en cuanto a CAB, el T2 presentó un menor consumo, y en RC, el T2 tuvo mayor rendimiento (66,12 %), lo que sugiere que la inclusión de la torta mejoró el rendimiento en canal.

Palabras clave: desempeño productivo, nutrición animal, subproductos, ración.

ABSTRACT

Contextualization: In Nariño, guinea pig raising is important for the economy and food security of farming families, and given that the feeding of this species represents 60-70% of production costs, it is essential to seek alternatives to improve productivity.

Knowledge gap: The effect of using chilacuán *(Vasconcellea pubescens)* seed cake as a raw material for guinea pig feed and its effect on the animal's productive parameters is unknown.

Objective: To assess the effect of incorporating chilacuán *(Vasconcellea pubescens)* seed cake as a supplement in the diet of guinea pigs (Cavia porcellus) and its influence on productive indices.

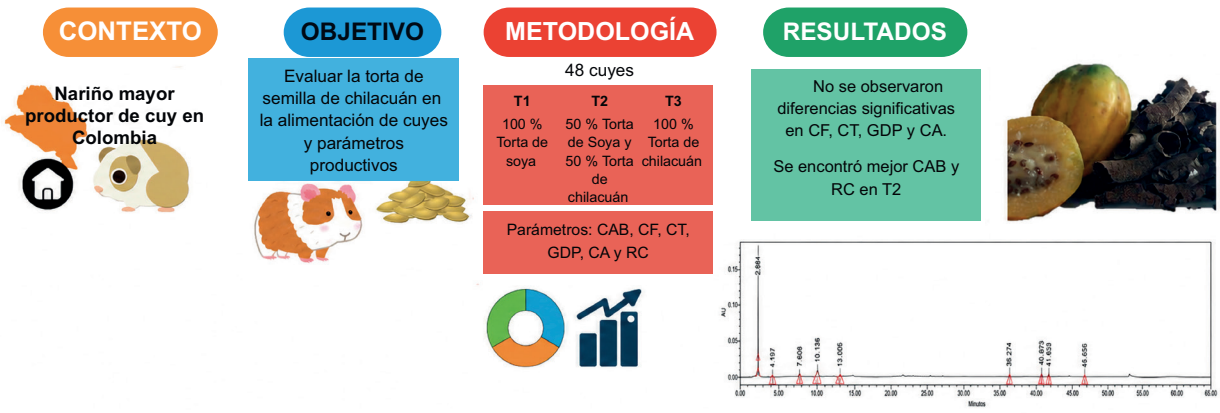
Methodology: Forty-eight weaned male guinea pigs were used. The animals were fed a diet of forage and supplement, the latter in the form of meal, with different proportions of chilacuán cake inclusion in relation to soybean cake, which established the following treatments: T0 (forage mixture + Supplement 1), T1 (forage mixture + Supplement 2) and T2 (forage mixture + Supplement 3). The nutritional content of forage and supplements was evaluated, as well as the presence of metabolites in chilacuán seed cake. The production indices evaluated were: feed dry matter intake (CAB), forage (CF) and total (CT), daily weight gain (DWG), feed conversion (FC) and carcass yield (CR). Differences were evaluated by analysis of variance and Duncan's test ($p<0.05$).

Results and conclusions: The chilacuán seed cake showed values of 32.5%, 36.5% and 22.2% of protein, fiber and ethereal extract, respectively, and the presence of saponins and phenolic compounds. Regarding productive indices, no significant differences were found for CF, CT, GDP and CA; in terms of CAB, T2 presented lower intake and in RC, T2 had a higher yield (66.12%), suggesting that the inclusion of the cake improved carcass yield.

Keywords: production performance, animal nutrition, by-products, ration.

RESUMEN GRÁFICO

Comportamiento productivo de cuyes (*Cavia porcellus*) suplementados con torta de semilla de chilacuán (*Vasconcellea pubescens*)



Fuente: autores.

1 INTRODUCCIÓN

El cuy (*Cavia porcellus*) es un mamífero roedor originario de la zona andina de Bolivia, Colombia, Ecuador y Perú. En Colombia, la producción para carne de esta especie se desarrolla principalmente en el departamento de Nariño y se ha constituido en un renglón importante, bajo sistemas de crianza familiar y comercial, con la posibilidad de intensificar la producción con bajas inversiones (Caycedo-Vallejo et al., 2009). Por otra parte, la carne de cuy tiene un gran valor nutritivo para el consumidor, lo que la ubica como un alimento adecuado para la población (Estrada Miño y Velastegui Bosquez, 2021).

El cuy se clasifica como monogástrico herbívoro y realiza fermentación posgástrica, con una gran capacidad de consumo de forraje verde (Caycedo-Vallejo et al., 2011). El mejoramiento productivo de la especie se ha logrado con la incorporación de suplementos balanceados en los programas de alimentación, especialmente en los sistemas de producción comercial, donde los cuyes reciben raciones balanceadas con recursos forrajeros y suplementos proteicos y energéticos para mejorar el contenido y calidad de la canal (Beltrán-Guzmáz, 2015).

Lo anterior, ha incrementado los costos de producción por concepto de alimentación, que llega a tener una participación entre el 60 % y el 70 % (Núñez-Torres, 2017). Para reducir estos costos, la investigación se encamina a encontrar alternativas a las materias primas de mayor costo en la suplementación

del cuy. A este respecto, estudios realizados por Caycedo-Vallejo et al. (2011) demuestran que la proteína es el nutriente de mayor impacto sobre los costos de elaboración de alimentos balanceados, por lo que la investigación se encamina a este tipo de nutriente.

Por otra parte, el departamento de Nariño tiene una diversidad de frutas andinas, debido a su ubicación geográfica privilegiada. Dentro de este grupo, se encuentra el chilacuán (*Vasconcellea pubescens*), una fruta que se está explorando en la elaboración de jugos, mermeladas, conservas, pulpas y otros productos para la región (Pantoja-Chamorro, 2016); su utilización genera residuos o fracciones no comestibles que representan cerca del 50 % de la fruta fresca, que no se aprovecha adecuadamente y que podría utilizarse como materia prima en la alimentación animal (Jurado-Erazo et al., 2023; Yepes et al., 2008).

Dentro de este grupo se encuentra la torta, que es el resultado de la extracción del aceite de la semilla de chilacuán (*Vasconcellea pubescens*). Los estudios sobre las semillas de chilacuán han demostrado que contienen flavonoides, polifenoles, ácidos grasos (oleico, palmítico, linoleico, esteárico); además, presentan compuestos bioactivos y actividad antioxidante, lo que hace de esta un subproducto de interés para la elaboración de suplementos animales (Illesca Mejía, 2022).

Por lo anterior, la investigación se centró en evaluar el efecto de incorporar torta de semilla de chilacuán (*Vasconcellea pubescens*) en suplementos en la dieta de cuyes (*Cavia porcellus*) y su influencia en los índices productivos.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

Localización. El trabajo de campo se realizó en la Granja Experimental Botana, de la Universidad de Nariño, situada a 8 kilómetros al sur del municipio de Pasto, departamento de Nariño. A una altura de 2820 m. s. n. m., con temperatura media de 12,6 °C, precipitación anual promedio de 953,7 mm y humedad relativa de 74 % a 80 %; las pruebas de laboratorio se desarrollaron en los laboratorios especializados de bromatología y cromatografía de la Universidad de Nariño, que están a una altitud de 2527 m. s. n. m., temperatura media de 12 °C, humedad relativa de 79 % y precipitación media anual de 700 milímetros (Ideam, 2021).

Animales y alojamiento. Se utilizaron cuarenta y ocho (48) cuyes machos destetados, mejorados mediante cruzamientos entre variedades criollas y la raza Perú, provenientes de la Granja Experimental Botana de la Universidad de Nariño, con peso promedio de 262 ± 12 g, entre 12 y 17 días de nacidos, previamente identificados. Se ubicaron en forma aleatoria en jaulas de malla metálica galvanizada con cuadros de 2 x 1 cm y grosor de 2 mm en piso y laterales, elevada del suelo, con dimensión de 0,5 m^2 para cada unidad experimental, con comedero, bebedero y pastera, dentro de un galpón con ventilación e iluminación natural, durante un periodo de 78 días a partir de su destete.

Obtención de la torta de semilla de chilacuán y elaboración de los suplementos. Las semillas de chilacuán se obtuvieron en una planta procesadora de conservas de frutas andinas. Una vez recibidas, fueron sometidas a secado en invernadero durante diez días, bajo condiciones controladas de temperatura (25 °C) y humedad relativa (60 %). Posteriormente, se pesaron y se procesaron mediante extracción de aceite por prensado en frío, utilizando un extrusor de tornillo sinfín en acero inoxidable (Komet, modelo DD 85, Alemania). Este procedimiento generó una torta proteica que, al ser pesada, permitió calcular un rendimiento del 70 %, equivalente a 0,7 kg de torta por cada kilogramo de semilla procesada. Finalmente, la torta obtenida fue molida en un molino de martillos (Industrias HD, modelo 9F-20) con cribas de 1,5 a 2 mm para ser incorporada como ingrediente principal en la formulación de los suplementos experimentales.

De acuerdo con la formulación presentada en la tabla 1, se elaboraron tres suplementos experimentales en harina diferenciados por el nivel de inclusión de torta de semilla de chilacuán en remplazo de torta de soya. El suplemento 1 (S1) se formuló con 100 % de torta de soya y sin inclusión de torta de semilla de chilacuán; el suplemento 2 (S2) combinó 50 % de torta de soya y 50 % de torta de semilla de chilacuán; y el suplemento 3 (S3) incorporó 100 % de torta de semilla de chilacuán como única fuente proteica. Los niveles de inclusión de torta de semilla de chilacuán se establecieron considerando el aporte proteico de cada ingrediente y no un remplazo en peso. La diferencia en las cantidades utilizadas (25 kg de torta de soya en S1, 30 kg de torta de chilacuán en S3 corresponde al ajuste necesario para mantener una concentración similar de proteína cruda en los tres suplementos. En el caso del suplemento (S2), las proporciones se ajustaron de forma que la combinación de ambos insumos alcanzara el nivel de proteína requerido para la dieta, por lo cual las cantidades en peso no son exactamente proporcionales al porcentaje de remplazo. Los demás ingredientes (maíz, trigo, mogolla, carbonato de calcio, premezcla vitamínico-mineral, melaza y sal) se ajustaron de acuerdo con la formulación para mantener el equilibrio nutricional. Todas las materias primas se mezclaron homogéneamente en un solo lote, garantizando la cantidad suficiente de suplemento para cubrir el periodo experimental completo.

Tabla 1.

Composición porcentual de los suplementos utilizados en los tratamientos experimentales

Ingredientes	Suplementos (%)		
	S1	S2	S3
Maíz	20	30	17
Trigo	14	29	14
Torta de soya	25	13,5	0

Ingredientes	Suplementos (%)		
	S1	S2	S3
Mogolla	27	0	25
Torta de semilla de chilacuán	0	13,5	30
$CaCO_3$	0,5	0,5	0,5
PVM	1	1	1
Melaza	12	12	12
Sal	0,5	0,5	0,5

S1 = suplemento con 100 % de torta de soya, *S2*=suplemento con 50 % de torta de soya y 50 % de torta de semilla de chilacuán, *S3* = suplemento con 100% torta de semilla de chilacuán.

Fuente: autores.

Alimentación y tratamientos. Los animales fueron manejados de acuerdo con las prácticas habituales de la granja de origen. Su dieta estuvo compuesta por una mezcla de forraje fresco sin picar, oreado desde el día anterior (*Cenchrus clandestinus*, *Phalaris* sp., *Trifolium pratense*, *Taraxacum officinale* y *Megathyrsus maximus*), complementado con uno de los tres suplementos en harina, en una proporción del 75 % de forraje y 25 % de suplemento balanceado. Los suplementos se suministraron a los tres tratamientos experimentales como se observa en la tabla 2. Cada suplemento se suministró en una ración única a las 7:00 a. m., mientras que el forraje se ofreció en dos raciones diarias (7:00 a. m. y 3:00 p. m.), no se suministró agua de bebida.

Tabla 2.

Tratamientos evaluados en la investigación

Tratamiento	Característica
T0	Mezcla forrajera con S1: 100 % torta de soya
T1	Mezcla forrajera con S2: 50 % torta de soya y 50 % de torta de semilla de chilacuán
T2	Mezcla forrajera con S3: 100 % torta de semilla de chilacuán

S1 = suplemento con 100 % de torta de soya, *S2* = suplemento con 50 % de torta de soya y 50 % de torta de semilla de chilacuán, *S3* = suplemento con 100 % torta de semilla de chilacuán.

Fuente: autores.

Análisis químico. Las muestras de la mezcla forrajera, de torta de semilla de chilacuán y suplementos fueron analizadas de acuerdo con los procedimientos estandarizados para el análisis químico de alimentos del laboratorio de bromatología de la Universidad de Nariño, basado en las técnicas de la AOAC (2019), de la siguiente manera: materia seca (MS), mediante el análisis de Weende, proteína cruda (PC) por el método de Kjeldahl, extracto etéreo (EE) por el método Soxhlet, ceniza (CEN) por el método de incineración en mufla, fibra detergente neutro (FDN) y fibra detergente ácido (FDA) por análisis de Van Soest secuencial. El extracto no nitrogenado (ENN) se determinó por diferencia de la siguiente manera: % ELN = 100 – (EE % + CEN % + PC % + FC %); mientras que la energía digestible (ED) por la fórmula de Osborn (1978): Mcal ED / kg MS + 0,0804 (% PB) + 0,02 (% FC) + 0,000377 (% ENN 2) + 0,01 (ENN) + 0,077 (% EE) - 0,152, el calcio (Ca) por espectroscopía de absorción atómica y el fósforo (P) por espectrofotometría UV-Vis (Thermo Scientific Genesys 150), empleando molibdato de amonio-antimonio y ácido ascórbico (formador del complejo azul de molibdeno).

Adicionalmente, se determinó el contenido de saponinas en la torta de semilla de chilacuán por técnicas fitoquímicas cualitativas preliminares y fenoles, mediante extracción asistida por ultrasonido, utilizando etanol grado HPLC; los extractos se concentraron a presión reducida y se diluyeron en ACN (acetonitrilo) para su posterior análisis. La identificación tentativa de los compuestos se realizó por comparación de tiempos de retención y espectros UV de estándares de compuestos fenólicos.

Índices productivos. Los cuyes se evaluaron desde el destete hasta el peso al beneficio, que para el estudio fue de 78 días. Los índices determinados fueron los consumos de alimento balanceado (CAB), forraje (CF) y total (CT), estos fueron medidos por diferencia entre el consumo ofrecido y rechazado, que luego se consolidó como un único valor de consumo por animal para todo el periodo experimental. La ganancia diaria de peso (GDP) se obtuvo del peso final menos el peso inicial dividido entre los días de evaluación, la conversión alimenticia por división del consumo de alimento total (CT) entre la ganancia de peso total y el rendimiento en canal mediante el pesaje del canal dividido entre el peso en vivo multiplicado por cien.

Análisis estadístico. Los animales (n = 48) fueron distribuidos aleatoriamente en tres tratamientos experimentales: T0 (mezcla forrajera + S1), T1 (mezcla forrajera + S2) y T2 (mezcla forrajera + S3), con cuatro réplicas por tratamiento. La unidad experimental fue la jaula, compuesta por cuatro cuyes, los cuales fueron alimentados en conjunto. Las variables de consumo de materia seca del balanceado (CAB), del forraje (CF) y total (CT) se midieron por jaula, debido a que no fue posible determinar el consumo individual. Para las variables ganancia diaria de peso (GDP), conversión alimenticia (CA) y rendimiento en canal (RC), aunque la medición fue individual, los datos fueron promediados por jaula, manteniendo así la unidad experimental constante para todo el análisis. Por tanto, el análisis estadístico se

realizó mediante un diseño completamente al azar de una vía, considerando como único factor fijo el tratamiento. Se verificaron los supuestos de normalidad de los residuos (mediante la prueba de Shapiro-Wilk) y homogeneidad de varianzas (mediante la prueba de Levene). Cuando se encontraron diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$) mediante ANOVA, las medias se compararon utilizando la prueba de rangos múltiples de Duncan. La información fue organizada en Microsoft Excel® y analizada en el *software* estadístico R versión 4.5.1.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis químico

Los resultados del análisis químico de la mezcla forrajera, torta de semilla de chilacuán y suplementos se describen en la tabla 3. La torta de semilla de chilacuán presentó bajo contenido de humedad (9,9 %), valor similar al alcanzado en otras tortas de semillas oleaginosas nativas de Colombia como: *Thevetia peruviana* con 8,74 %, *Gossypium hirsutum* L. con 8,92 % y *Enterolobium clocarpum* con 8,92 %. Valores inferiores al 10 % de humedad evidencian alto porcentaje de materia seca, lo que favorece su conservación y almacenamiento, evitando la formación de hongos y micotoxinas que deterioran el producto (Lafont et al., 2019); al respecto, los resultados para la torta de semilla de chilacuán son prometedores, dado que este valor está por debajo de este parámetro establecido.

Tabla 3.
Análisis químico de la mezcla forrajera, torta de semilla de chilacuán y suplementos

Análisis químico*	Mezcla forrajera	Torta de chilacuán	Suplementos		
			S1	S2	S3
Materia seca (%)	16,3	90,1	84,7	84,2	83,9
Ceniza (%)	10,5	6,16	7,0	6,3	7,2
Extracto etéreo (%)	3,1	22,2	3,5	4,4	8,1
Fibra cruda (%)	27,2	36,5	5,2	7,7	13,0
Proteína cruda (%)	12,9	32,5	21,9	19,6	19,4
Extracto no nitrogenado (%)	46,3	2,65	62,4	62,0	52,3
Calcio (%)	0,5	0,6	1,0	1,2	1,2
Fósforo (%)	0,4	0,7	0,6	0,5	0,8

Análisis químico*	Mezcla forrajera	Torta de chilacuán	Suplementos		
			S1	S2	S3
FDN (%)	53,7	40,3	-	-	-
FDA (%)	36,8	35,9	-	-	-
kcal ED/kg MS	2598,33	3957,20	3483,29	3461,00	3319,04

* El porcentaje se expresa con relación a la materia seca.

Fuente: autores

Por otra parte, el contenido de extracto etéreo (EE) fue alto (22,2 %) para la torta de semilla de chilacuán, esto es resultado del método de extracción usado. Generalmente las tortas procedentes de técnicas mecánicas como la extrusión tienen mayor contenido de materia grasa (11 % a 33 %) que las obtenidas por procedimientos industriales (1 % a 3 %), ya que estas últimas usan distintos solventes químicos para este proceso (Sarkar et al., 2021), lo que respalda los resultados encontrados.

Para el caso de la fibra cruda (FC), el reporte de la torta de semilla de chilacuán es similar a lo obtenido en otras tortas, en especial a las usadas en la alimentación animal, como *Helianthus annuus* (20,7 %) y *Gossypium hirsutum* L. (24,5 %); sin embargo, se debe resaltar que este valor es superior al reportado en tortas de *Brassica napus* (9,7 %) y *Glycine max* (6 %) (De Blas et al., 2019; Ortiz-Narváez, 2010; Sarkar et al., 2021), siendo esta última una de las más importantes materias primas para la elaboración de alimentos balanceados para animales.

El contenido de proteína bruta (PB) en la torta de semilla de chilacuán fue de 32,5 %, el cual podría cubrir los requerimientos nutricionales de especies menores; aunque su contenido de proteína bruta es ligeramente inferior en comparación con opciones más comunes como la torta de soya (44 %), similar a la torta de girasol (34 %) y torta de nabo (33,9 %), y superior a las tortas de algodón (24 %) y maracuyá (24,61 %). Esto le confiere una ventaja para su uso en alimentación animal como alternativa a la torta de soya, teniendo en cuenta que esta última materia prima es de baja disponibilidad en el departamento de Nariño (Colombia) y además el costo de adquisición es elevado (De Blas et al., 2019; Lafont et al., 2019; Mazón-Paredes et al., 2021; Ortiz-Narváez, 2010; Sarkar et al., 2021).

Asimismo, se observó una disminución del contenido proteico entre la torta de chilacuán (32,5 %) y el suplemento S3 (19,4 %), situación atribuida a la inclusión de ingredientes de carácter energético en la formulación, los cuales generaron un efecto de dilución de la proteína en la mezcla final. Adicionalmente, la torta de soya presentó un contenido proteico superior (44 %), lo que explica las diferencias observadas entre ambas materias primas. Debido a esta variación en la concentración de proteína, la

sustitución de la torta de soya por torta de chilacuán no se realizó bajo un criterio de equivalencia en peso, sino considerando el aporte proteico de cada ingrediente con el fin de aproximar los niveles nutricionales establecidos para los suplementos.

En cuanto al contenido de calcio (0,6 %) y fósforo (0,7 %), se encontraron valores similares a los mostrados en torta de nabo (0,7 % y 1,04 %), torta de girasol (0,49 % y 1 %), superiores a la torta de soya (0,3 % y 1,06 %) y menores a la torta de maracuyá (2,92 % y 0,3 %) (Cedeño Quiñonez y Meza Cisneros, 2024).

Se debe resaltar que el análisis químico de la torta de semilla de chilacuán presenta un perfil nutricional destacado por su alto contenido de FC, PB y EE, convirtiéndose en una excelente fuente de nutrientes para la formulación de dietas para cuyes, esto debido a que es difícil encontrar valores altos de estos tres componentes en una misma materia prima. Su inclusión puede ser una alternativa económicamente viable, en comparación con otras opciones disponibles como la torta de soya.

Metabolitos secundarios

El análisis fitoquímico preliminar de la torta de semilla de chilacuán evidenció una presencia abundante (+++) de saponinas, esto sugiere una alta concentración de estos metabolitos secundarios. Aunque el análisis fue cualitativo, este tipo de prueba es confiable para establecer la riqueza relativa del metabolito. Al respecto, las saponinas son glicósidos triterpénicos o esteroidales con actividad superficial marcada, reconocidas por sus propiedades antimicrobianas, inmunomoduladoras, hipocolesterolémicas y antinutricionales, dependiendo de su concentración y estructura química (Cheok et al., 2014).

Los estudios realizados sobre la inclusión de fuentes vegetales ricas en saponinas en especies monogástricas como el cuy son pocos, la información disponible no ha permitido establecer con rigurosidad entre sus efectos beneficiosos y los posibles impactos antinutricionales. Estudios realizados por Francis et al. (2002) encontraron que, a dosis bajas o moderadas, las saponinas pueden mejorar la digestibilidad de nutrientes, modular positivamente la microbiota intestinal y reducir la carga parasitaria intestinal.

A diferencia de la torta de semilla de chilacuán, la torta de soya también contiene saponinas, pero en menor proporción. En cuyes alimentados con dietas basadas en torta de soya, los efectos de las saponinas han sido asociados con ligeros incrementos en el tamaño del ciego y disminución de la absorción proteica, aunque sin impacto negativo significativo sobre los parámetros productivos cuando su inclusión es moderada (Murillo Cano et al., 2024). Estudios realizados en otras especies como el conejo han mostrado que las saponinas en niveles controlados pueden reducir el colesterol plasmático, estimular la secreción biliar y favorecer el metabolismo hepático, efectos que podrían ser extrapolables al cuy (Chaudhary et al., 2018); sin embargo, en esta investigación no se observaron efectos negativos sobre los índices productivos, pero se requiere ampliar estudios para generar conclusiones más sólidas.

El interés por incluir ingredientes funcionales de origen vegetal en la alimentación

animal está en auge. En este aspecto, las saponinas se asocian con mejoras en la eficiencia alimenticia y respuesta inmune. Existen indicios de que las saponinas pueden actuar como promotores de crecimiento alternativos, en sustitución de antibióticos, por su capacidad para modificar la microbiota intestinal y mejorar la integridad de la mucosa digestiva (Chaudhary et al., 2018).

Por otra parte, el análisis cromatográfico (HPLC-DAD) de la torta de semilla de chilacuán reveló la presencia de una variedad de compuestos fenólicos clasificados tentativamente como ácidos hidroxibenzoicos, flavanoles y flavonoles (figura 1 y tabla 4).

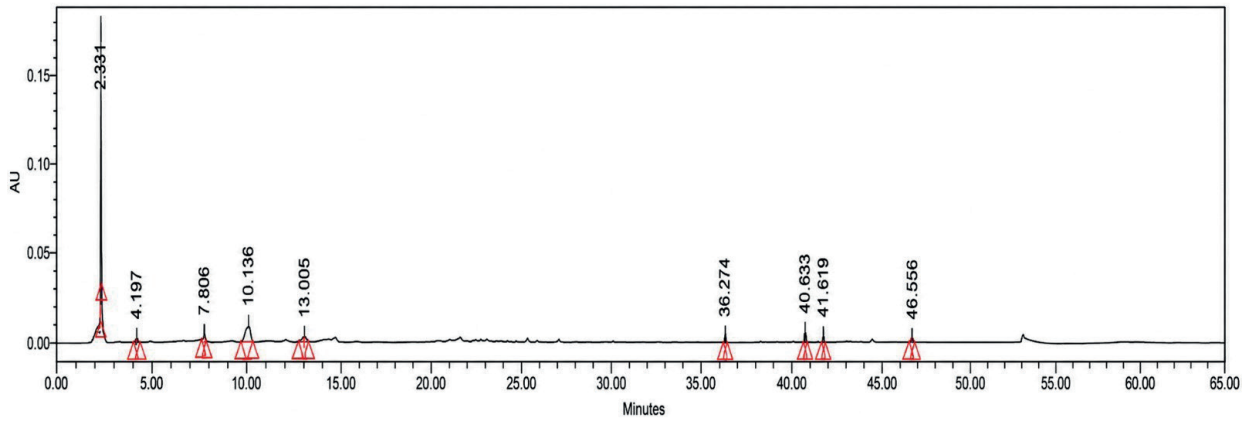


Figura 1. Perfil de compuestos fenólicos por HPLC-DAD en la torta de semilla de chilacuán a 230 nm

Fuente: autores.

Tabla 4.

Identificación tentativa de compuestos fenólicos en muestra de torta de semilla de chilacuán

N.º	Identificación	Tiempo de retención promedio (min)	Área promedio	% Área promedio
1	Compuesto con bandas UV característica de los ácidos hidroxibenzoicos	4,20	21262	7,0
2	Compuesto con bandas UV característica de los ácidos hidroxibenzoicos	7,81	23440	7,7
3	Ácido 4-hidroxibenzoico[a]	10,14	165739	54,6
4	Compuesto con bandas UV característica de los ácidos hidroxibenzoicos	13,00	41458	13,7

N,º	Identificación	Tiempo de retención promedio (min)	Área promedio	% Área promedio
5	Compuesto con bandas UV característica de los flavanoles	36,27	13686	4,5
6	Compuesto con bandas UV característica de los flavanoles	40,68	22673	7,5
7	Compuesto con bandas UV característica de los flavonoles	41,62	15449	5,1

[a] El compuesto 3 se identificó por comparación de estándar y espectro UV-Vis

Fuente: autores.

El compuesto dominante fue el ácido 4-hidroxibenzoico, representando más de la mitad del contenido fenólico detectado (54,6 %), seguido de un compuesto no identificado del grupo hidroxibenzoico (13,7 %). La presencia de flavonoides (flavanoles y flavonoles) también fue significativa, representando aproximadamente el 17,1 % del total (Tabla 4).

Al respecto, los compuestos fenólicos son ampliamente reconocidos por sus propiedades antioxidantes, antinflamatorias y antimicrobianas, lo cual puede tener efectos positivos sobre la salud y productividad de los animales de granja. En particular, el ácido 4-hidroxibenzoico, principal componente hallado en esta muestra ha sido reportado por su capacidad de modular la microbiota intestinal, mejorar la absorción de nutrientes y actuar como agente hepatoprotector (Scalbert et al., 2002).

En sistemas de producción intensiva de animales de granja, el estrés oxidativo inducido por dietas altamente energéticas puede afectar negativamente el crecimiento y la conversión alimenticia. La suplementación con compuestos fenólicos se ha propuesto como estrategia para mitigar estos efectos. Al respecto, Marcatoma Capito et al. (2018) demostraron que la inclusión de extractos ricos en ácido gálico y 4-hidroxibenzoico mejoró el índice de conversión alimenticia y la ganancia de peso en cuyes. Además, la presencia de flavonoles como los detectados en el análisis se relacionan con una mejor integridad intestinal y modulación del sistema inmune en especies monogástricas (Surai, 2014), lo cual resulta relevante para reducir la incidencia de enteropatías y mejorar la eficiencia productiva.

Índices productivos

Con respecto a los índices productivos, en la tabla 5 se puede observar que para las variables consumo, únicamente el alimento balanceado mostró diferencias estadísticas ($p < 0,05$), con un menor consumo del tratamiento T2, en comparación con los otros tratamientos, mientras que el forraje y total fueron similares ($p > 0,05$). De igual manera, la ganancia diaria de peso y conversión alimenticia tuvieron respuestas semejantes en los tratamientos ($p > 0,05$), mientras que el rendimiento en canal fue mejor para el tratamiento T2 ($p < 0,05$).

Tabla 5.

Índices productivos de los cuyes obtenidos con las diferentes dietas experimentales

Variables	Tratamientos			Valor p
	T0	T1	T2	
Consumo materia seca balanceado (g/animal/día)	16,49[a]	16,01[a]	14,64[b]	0,04
Consumo materia seca forraje (g/animal/día)	50,91[a]	50,11[a]	51,8[a]	0,49
Consumo total de materia seca (g/animal /día)	67,39[a]	66,12[a]	66,44[a]	0,6
Ganancia diaria de peso(g/animal/día)	10,71[a]	10,39[a]	11,42[a]	0,3
Conversión alimenticia	6,29[a]	6,45[a]	5,85[a]	0,29
Rendimiento en canal (%)	64,29[b]	64,64[b]	66,12[a]	0,02

Fuente: autores.

Consumo. La reducción en el consumo de alimento balanceado para el tratamiento T2 puede estar relacionada con la presencia de metabolitos secundarios, especialmente el contenido de saponinas (+++), encontrados en la torta de semilla chilacuán. Al respecto, Francis et al. (2002) señalaron que las saponinas pueden afectar la palatabilidad y la absorción intestinal en especies monogástricas, reduciendo la ingesta de alimento. Por otra parte, el alto contenido de extracto etéreo (22,2 %) de la torta de semilla de chilacuán, que influyó en el contenido del suplemento tres (S3 con 8,4 % EE) podría haber modificado las características organolépticas del suplemento, disminuyendo su aceptación o generando un aumento de la saciedad como consecuencia de un mayor valor energético del suplemento (Ranea-Robles et al., 2022).

A pesar de que el consumo de alimento balanceado disminuyó significativamente en el tratamiento con 100 % de la torta de semilla de chilacuán (T2), los otros dos consumos no variaron entre tratamientos (consumo de forraje y consumo total). Este fenómeno sugiere un mecanismo compensatorio por parte de los cuyes, donde al reducirse la ingesta de suplemento balanceado, los animales incrementan otras actividades fisiológicas como la cecotrofía para satisfacer sus requerimientos energéticos y proteicos. Este tipo de comportamiento ha sido descrito en monogástricos herbívoros como el cuy y el conejo, que tienen un sistema digestivo adaptado para este tipo de procesos, que les permiten aprovechar de manera más eficiente el alimento consumido (Caycedo-Vallejo et al., 2011; Caycedo-Vallejo et al., 2009; NRC, 1995).

Adicionalmente, los valores reportados en esta investigación para consumo total (CT), que oscilan entre 66,12 y 67,39 g de materia seca por día, se encuentran dentro del rango considerado óptimo para cuyes en etapa de crecimiento y engorde, que va de 60 a 75 g MS/día, dependiendo del tamaño del

animal, la temperatura ambiental y la densidad energética del alimento (Valverde et al., 2021). Este hallazgo es importante, ya que demuestra que la inclusión de torta de semilla de chilacuán no compromete el consumo total, lo que implica que la sustitución de torta de soya por esta fuente proteica alternativa no genera rechazo alimentario ni efectos negativos sobre la ingesta del animal.

Ganancia diaria de peso. La ganancia diaria de peso (GDP) encontrada para todos los tratamientos indica que la inclusión de la torta de semilla de chilacuán, remplazando el 50 % y el 100 % de la torta de soya, no afectó negativamente el desempeño productivo de los cuyes, en comparación con el tratamiento testigo. Esta ausencia de diferencias sugiere que la torta de semilla de chilacuán es comparable a la de una fuente proteica convencional. Por otra parte, la torta de semilla de chilacuán evidencia un importante valor nutricional del suplemento alternativo, ya que su contenido nutricional se alinea con las recomendaciones nutricionales para cuyes en etapa de engorde propuestas por el *National Research Council* (NRC), (1995) y Caicedo-Vallejo et al. (2011), quienes sostienen que un suplemento para esta especie debe tener entre 18 % y 20 % de proteína y niveles de energía metabolizable adecuados para promover el crecimiento sin comprometer la salud digestiva.

Además, los valores encontrados de GDP (de 10,39 a 11,42 g/día) son similares a los reportados por Díaz Céspedes et al. (2021), quienes evaluaron la inclusión de torta de sacha inchi (*Plukenetia volubilis*) en suplementos para cuyes (9,6 y 10,8 g/día) y García Díaz (2017), donde se remplazó parcial y totalmente la torta de soya con torta de girasol (*Helianthus annuus*) en cuyes (8,9 y 10,4 g/día). Este último estudio observó una disminución de la GDP cuando se incrementó la inclusión de la fuente alternativa, factor no observado en esta investigación.

Conversión alimenticia. Al igual que la GDP, la conversión alimenticia (CA) fue similar entre tratamientos, lo cual indica que la inclusión parcial o total de torta de semilla de chilacuán en la dieta no afectó negativamente la eficiencia alimenticia de los cuyes, en comparación con la dieta control. Esto es relevante, dado que la torta de semilla chilacuán, a pesar de presentar un mayor contenido de extracto etéreo (22,2 %) y fibra cruda (36,5 %) respecto a la torta de soya, mantiene niveles de eficiencia alimenticia similares.

Los valores encontrados en esta investigación para la CA fueron de 5,85 a 6,45, que son similares a los reportados por Insuasty y Jurado-Gámez (2020) y Díaz Céspedes et al. (2021), que oscilan entre 5,5 y 7,0, dependiendo del tipo de suplemento, la genética del animal y el sistema de alimentación. De igual manera los reportados por García Díaz (2017), quien evaluó la sustitución de torta de soya por torta de girasol en dietas para cuyes, obteniendo una CA entre 7,3 y 7,4, lo que confirma que los resultados se ubican en la media esperada.

Rendimiento en canal. Los cuyes del tratamiento T2 presentaron el mayor rendimiento en canal (RC), 66,12 %, en comparación con los tratamientos T0 y T1 (64,29 % y 64,64 %, respectivamente). Esta diferencia indica que el remplazo de 100 % de torta de

soya por torta de semilla de chilacuán mejora la eficiencia en la transformación del alimento en tejido corporal aprovechable, lo cual puede estar relacionado con la presencia de compuestos bioactivos como flavonoides y ácido 4-hidroxibenzoico que pueden haber potenciado la digestibilidad y el metabolismo proteico, igualmente los polifenoles juegan un papel importante en la proliferación de bacterias intestinales beneficiosas que posiblemente mejoraron el aprovechamiento de los nutrientes (David y Escobar, 2015; Cardona-Iglesias et al., 2019; Bešlo et al., 2023).

Por otro lado, el suplemento S3 presentó un mayor contenido de fibra cruda. La fibra constituye un componente esencial en la dieta de los cuyes, ya que contribuye a regular la motilidad gastrointestinal y a retardar el tránsito del alimento a lo largo del tracto digestivo, permitiendo una digestión más completa y un mejor aprovechamiento de los nutrientes. Además, actúa como sustrato energético para la microbiota presente en el ciego, favoreciendo los procesos fermentativos y la producción de ácidos grasos volátiles (Alminta, 2024). En este contexto, los animales suplementados con S3 habrían recibido una dieta con un equilibrio más adecuado entre energía y fibra fermentable, lo que optimizó la fermentación cecal y la eficiencia en la utilización de los nutrientes, reflejándose en un mayor rendimiento en canal.

De igual manera, se debe resaltar, que el tratamiento T1 al presentar un RC similar al testigo también es una alternativa viable en la alimentación de los cuyes para carne. Cabe destacar que los resultados del presente estudio contrastan favorablemente con los obtenidos por Aime Cjanahuire et al. (2023), quienes reportaron rendimientos en canal entre 62 % y 64 % en cuyes alimentados con subproductos como camote y pulpa de café. Aunque estos subproductos aportan energía, su menor valor biológico proteico podría haber limitado la eficiencia de crecimiento y, en consecuencia, el RC.

4 CONCLUSIONES

La torta de semilla de chilacuán constituye una alternativa viable para remplazar total o parcialmente la torta de soya en la alimentación de cuyes, sin afectar el consumo total ni el crecimiento, y mejora el rendimiento en canal. Su aprovechamiento no solo reduce la dependencia de insumos convencionales de alto costo, sino que contribuye a la valorización de subproductos agroindustriales.

CONTRIBUCIÓN DE LA AUTORÍA

Todos los autores contribuyeron en el proceso y culminación de la propuesta final de este artículo de investigación.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a los grupos de investigación en Frutales Andinos y Agroforestería y Recursos Naturales (ARENA), por el aval otorgado para la presentación de la propuesta de investigación, y a la Vicerrectoría de Investigación e Interacción social de la Universidad de Nariño.

FINANCIAMIENTO

La presente investigación fue financiada por la Universidad de Nariño, a través de la Vicerrectoría de Investigación e Interacción Social, en el marco del proyecto titulado "Evaluación del comportamiento productivo de cuyes (*Cavia porcellus*) suplementados con torta de semilla de chilacuán (*Vasconcellea* sp.)", identificado con el código 2522 y aprobado mediante el Acuerdo N.º 25 del 8 de marzo de 2022.

USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Los autores del artículo utilizaron la inteligencia artificial para crear el boceto del artículo, pero a partir de este, fueron los autores los que siguieron con el ajuste y finalización del mismo.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen ningún conflicto de intereses.

LITERATURA CITADA

Aime Cjanahuire, E., Ramos Mamani, L. A., Telles Velásquez, R. del P., Padilla Mamani, M. Á. y Flores Aybar, H. (2023). Efecto de la alimentación en la productividad del cuy (Cavia porcellus) en la fase de desar-

rollo. *Revista Alfa*, *7*(21), 567-572. https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v7i21.237

Alminta, N. (2024). *Influencia del nivel de fibra sobre la digestibilidad de cuyes hembras en diferentes edades*. [Tesis de Pregrado]. Universidad de San Antonio Abad del Cusco. https://repositorio.unsaac.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12918/10460/253T20242046_TC.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Association of Official Agricultural Chemists [AOAC]. (2019). *Official Methods of Analysis of AOAC*. https://www.aoac.org/official-methods-of-analysis-21st-edition-2019/

Beltrán-Guzmáz, A. (2015). *Efecto de diferentes niveles de suplementación de energía y proteína sobre algunos indicadores metabólicos y productivos en el levante y engorde de cuyes (Cavia porcellus)* [Tesis de Maestría]. Universidad de Nariño. http://sired.udenar.edu.co/1691/1/90964.pdf

Bešlo, D., Golubic, N., Rastija, V. Agic, D., Karnaš, M. Šubaric, D. & Lucic, B. (2023). Antioxidant Activity, Metabolism, and Bioavailability of Polyphenols in the Diet of Animals. *Antioxidants, 12*(6), 1141, 12-27. https://doi.org/10.3390/antiox12061141

Cardona Iglesias, J. L., Patiño Burbano, R. E., Carlosama Ojeda, L. D., Portillo López, P. A. y Moreno Vargas, D. C. (2019). Parámetros zootécnicos de Cavia porcellus en sistemas productivos de Nariño y Putumayo (Colombia). *CES Medicina Veterinaria y Zootecnia*, *14*(3), 29-41. https://doi.org/https://doi.org/10.21615/cesmvz.14.3.3

Caycedo-Vallejo, A., Zamora-Burbano, A., Echeverry-Potosí, S., Enríquez-Chamorro, R., Ortega-David, E., Burgos-Velasco, M., & Caicedo-Egas, M. (2011). *Producción sostenible de cuyes* (Primera). Editorial de la Universidad de Nariño.

Caycedo-Vallejo, A., Rico-Numbela, E., Aliaga-Rodríguez, L., & Moncayo-Galliani, R. (2009). *Producción de cuyes*. Universidad Católica Sedes Sapientiae.

Cedeño Quiñonez, D. A., y Meza Cisneros, J. A. (2024). Aprovechamiento de las semillas de maracuyá para la obtención de torta para alimentación animal. *Actas del Congreso de Investigación, Desarrollo e Innovación*, 303-310. https://doi.org/10.47300/actasidi-unicyt-2023-47

Chaudhary, S. K., Rokade, J. J., N. Aderao, G., Singh, A., Gopi, M., Mishra, A., & Raje, K. (2018). Saponin in Poultry and Monogastric Animals: A Review. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, *7*(7), 3218-3225. https://doi.org/10.20546/ijcmas.2018.707.375

Cheok, C. Y., Salman, H. A. K., & Sulaiman, R. (2014). Extraction and quantification of saponins: A review. *Food Research International*, *59*, 16-40. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.01.057

David, D. y Escobar, P. (2015). *Evaluación del desempeño productivo y reproductivo de una raza sintética en cavia porcellus formada a partir de cuyes nativos y peruanos en el Departamento de Nariño* [Tesis

de Pregrado, Universidad de Nariño]. https://sired.udenar.edu.co/3242/

De Blas, P., García-Rebollar, M., Gorrachategui, M. y Mateos, G. (2019). Tablas FEDNA de composición y valor nutritivo de alimentos para la fabricación de piensos compuestos (4.ª ed.). *Fundación Española para el Desarrollo de la Nutrición Animal* (FEDNA). https://www.fundacionfedna.org/ingredientes-para-piensos

Díaz Céspedes, M., Rojas Paredes, M. A., Hernández Guevara, J. E., Linares Rivera, J. L., Durand Chávez, L. M. y Moscoso Muñoz, J. E. (2021). Digestibilidad, energía digestible y metabolizable del sacha inchi (Plukenetia volubilis L) peletizado y extruido en cuyes (Cavia porcellus). *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*, *32*(5), e19654. https://doi.org/10.15381/rivep.v32i5.19654

Estrada Miño, E. E. y Velastegui Bosquez, G. A. (2021). Caracterización de la carne de cuy empacado al vacío. Un estudio para su exportación. *Revista de Ingeniería y sus Avances*, *5*(12), 123-134. https://doi.org/10.33996/revistaingenieria.v5i12.79

Francis, G., Kerem, Z., Makkar, H. P. S., & Becker, K. (2002). The biological action of saponins in animal systems: a review. *British Journal of Nutrition*, *88*(6), 587-605. https://doi.org/10.1079/BJN2002725

García Díaz, E. (2017). *Evaluación de tres niveles de torta de girasol (5%, 10% y 15%) como fuente de proteína en la alimentación de cuyes en la etapa de engorde en la región San Martín* [Tesis de Pregrado]. Universidad Nacional de San Martín-Tarapoto. https://repositorio.unsm.edu.pe/item/287d2189-a6fe-4280-bf65-d620cb046b07

Illesca Mejía, L. T. (2022). *Evaluación del potencial nutraceútico y antibacteriano del extracto de semillas de papaya andina (vascocelle pubescens) frente a Salmonella enteritidis y Escherichia coli* [Tesis Pregrado]. Universidad Científica del Sur. https://repositorio.cientifica.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12805/2672/TL-Illescas%20M-Ext.pdf?sequence=5&isAllowed=y

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [Ideam]. (2021). *Consulta y descarga de datos hidrometereológicos.* https://atencionciudadano.ideam.gov.co/

Insuasty, G. y Jurado-Gámez, H. (2020). Remolacha forrajera Beta vulgaris sembrada en microtúneles y su efecto en parámetros productivos del cuy. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, *18*(1), 74-83. https://doi.org/https://doi.org/10.18684/bsaa.v18n1.1421

Jurado-Erazo, D. K., Tulcán-Cuasapud, Y. A. y Rojas González, A. F. (2023). Perspectivas de valorización de residuos de frutas a partir de sus características físicas. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, *24*(1), e3016. https://doi.org/10.21930/rcta.vol24_num1_art:3016

Lafont, J. J., Espitia, A. A. y Páez, M. S. (2019). Estudio Fisicoquímico del aceite y análisis proximal de la torta de semillas oleaginosas nativas de Córdoba-Colombia. *Información Tecnológica*, *30*(4),

85-92. https://doi.org/10.4067/S0718-07642019000400085

Marcatoma Capito, J. M., Fiallos López, M. B., Jiménez Yánez, S. F., Usca Méndez, J. E. y Zurita León, M. E. (2018). Compuestos fenólicos de *Allium sativum* en la alimentación de cuyes durante la etapa de crecimiento-engorde. *Revista Observatorio de la Economía Latinoamericana*. https://www.eumed.net/rev/oel/2018/02/ajo-alimentacion-cuyes.html

Mazón-Paredes, E., Herrera-Rodríguez, M., Mazón-Paredes, C., García-Martínez, A., Delgado-Pertíñez, M., &. y Guzmán--Guerrero, J. L. (2021). Efecto de la zona de procedencia y época de muestreo sobre la composición bromatológica de la torta de maracuyá. *Revista Científica de la Facultad de Ciencias Veterinarias*, *31*(4), 163-170. https://doi.org/10.52973/rcfcv-luz314.art6

Murillo Cano, K. B., Arellano Gómez, J. J., Zambrano Moreira, R. R. y Calderón Tobar, Á. del R. (2024). Valoración de los promotores de crecimiento naturales en la alimentación de cuyes (cavia porcellus) para la eficiencia de los parámetros productivos. *Revista Conocimiento Global*, *9*(3), 263-277. https://doi.org/10.70165/cglobal.v9i3.462

National Research Council [NRC] (1995). *Nutrient Requirements of Laboratory Animals* (4th ed.). National Academy Press.

Núñez-Torres, O. (2017). Los costos de la alimentación en la producción pecuaria. *J. Selva Andina Anim. Sci*, *4*(2), 93-94. https://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2311-25812017000200001

Ortiz-Narváez, Y. (2010). *Composición química y toxicológica preliminar de la torta de semilla del fruto de totumo (Crescentia cujete) cultivado en el departamento del Cauca* [Tesis de Pregrado]. Universidad del Cauca. http://alejandria.unicauca.edu.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=102140&query_desc=au%2Cwrdl%3A%20Ortiz-Narv%C3%A1ez%2C%20Y.

Pantoja-Chamorro, A. L. (2016). *Extracción de aceites con fluidos supercríticos a partir de semillas de frutas con potencialidad en la industria cosmética* [Tesis de Maestría]. Universidad Nacional de Colombia. https://repositorio.unal.edu.co/items/1806f00a-2f3b-4507-aa84-d95c046c56e2

Ranea-Robles, P., Lund, J., & Clemmensen, C. (2022). The physiology of experimental overfeeding in animals. *Molecular Metabolism*, *64*, 101573. https://doi.org/10.1016/j.molmet.2022.101573

Sarkar, N., Chakraborty, D., Dutta, R., Agrahari, P., Sundaram, D., Singh, A., & Jacob, S. (2021). A comprehensive review on oils.eed cakes and their potential as a feedstock for integrated biorefinery. *Journal of Advanced Biotechnology and Experimental Therapeutics*, *4*(3), 376-384. https://doi.org/10.5455/jabet.2021.d137

Scalbert, A., Morand, C., Manach, C., & Rémésy, C. (2002). Absorption and metabolism of polyphenols in the gut and impact on health. *Biomedicine & Phar-*

macotherapy, *56*(6), 276-282. https://doi.org/10.1016/S0753-3322(02)00205-6

Surai, P. F. (2014). Polyphenol compounds in the chicken/animal diet: from the past to the future. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, *98*(1), 19-31. https://doi.org/10.1111/jpn.12070

Valverde, P., Trujillo, J., Díaz, H. y Toalombo, P. (2021). Alimentación de cuyes (*Cavia porcellus*) con pastos y forrajes de clima tropical en Pastaza-Ecuador bajo un sistema de crianza piramidal. *Actas Iberoamericanas de Conservación Animal*, *16*, 59-66. https://s59b6fdfe9e4460e7.jimcontent.com/download/version/0/module/19268700925/name/AICA_Vol16_Trabajo011.pdf

Yepes, S. M., Montoya Naranjo, L. J. y Orozco Sánchez, F. (2008). Valoración de residuos agroindustriales -frutas- en Medellín y el sur del Valle del Aburrá. *Revista Facultad Nacional de Agronomía-Medellín*, *61*(1), 4422-4431. https://revistas.unal.edu.co/index.php/refame/article/view/24742

Conflicto de intereses
Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Licencia de Creative Commons
Revista de Investigación Agraria y Ambiental is licensed under a Creative Commons Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual 4.0 Internacional License.

Fecha de recibido: 03-09-2025
Fecha de aceptado: 26-02-2026
DOI: 10.22490/21456453.10351

DESEMPEÑO PRODUCTIVO, SANITARIO Y VIABILIDAD ECONÓMICA DE OVINOS CRIOLLOS SUPLEMENTADOS CON BLOQUES MULTINUTRICIONALES A BASE DE HARINA DE HOJA DE YUCA Y AFRECHO DE YUCA

PRODUCTIVE PERFORMANCE, HEALTH AND ECONOMIC VIABILITY OF CREOLE SHEEP SUPPLEMENTED WITH MULTINUTRITIONAL BLOCKS BASED ON CASSAVA LEAF MEAL AND CASSAVA BRAN

Emiro Andrés Suárez-Paternina[1]
Yacerney Paternina-Paternina[2]
Lorena Aguayo-Ulloa[3]
Lorena Mestra-Vargas[4]
José Edwin Mojica-Rodríguez[5]
Adriana Patricia Tofiño-Rivera[6]

Citación: Suárez-Paternina, E., Paternina-Paternina, Y., Aguayo-Ulloa, L., Mestra-Vargas, L., Mojica-Rodríguez, J. y Tofiño-Rivera, A. (2026). Desempeño productivo, sanitario y viabilidad económica de ovinos criollos suplementados con bloques multinutricionales a base de harina de hoja de yuca y afrecho de yuca. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental, 17*(2), 203-228. https://doi.org/10.22490/21456453.10351

[1] Magíster en Ciencias Veterinarias del Trópico. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - Agrosavia, sede El Carmen de Bolívar, Colombia. esuarez@agrosavia.co
[2] Magíster en Ciencia Animal. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - Agrosavia, sede El Carmen de Bolívar, Colombia. ypaternina@agrosavia.co
[3] Doctora. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - Agrosavia, Cereté, Colombia. laguayo@agrosavia.co
[4] Doctora. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria -Agrosavia, Cereté, Colombia. lmestra@agrosavia.co
[5] Doctor. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - Agrosavia, Agustín Codazzi, Colombia. jmojica@agrosavia.co
[6] Doctora. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - Agrosavia, Agustín Codazzi, Colombia. atofino@agrosavia.co

RESUMEN

Contextualización: En la región Caribe colombiana, las sequías afectan la disponibilidad y calidad del pasto, reduciendo la productividad de los sistemas ovinos. Ante este escenario, se requieren estrategias alimenticias sostenibles que minimicen el impacto de la estacionalidad. Una alternativa eficiente es el uso de bloques multinutricionales (BMN), elaborados con subproductos agrícolas como hoja y afrecho de yuca, que pueden aportan nutrientes esenciales para la producción animal.

Vacío de conocimiento: Aunque en la región existe un creciente interés en aprovechar subproductos del cultivo de yuca para la alimentación animal, persiste un vacío de conocimiento sobre su efecto en parámetros productivos, de salud y calidad de canal de ovinos criollos. La información actual es limitada y se enfoca principalmente en la respuesta animal, dificultando la formulación de recomendaciones técnicas para su inclusión en BMN como estrategia nutricional en épocas críticas.

Objetivo: Evaluar el desempeño productivo, sanitario y la viabilidad económica de ovinos criollos suplementados con BMN a base de harina de hoja y afrecho de yuca.

Metodología: El estudio se desarrolló en el Centro de Investigación Turipaná, Sede El Carmen de Bolívar (Agrosavia). Se utilizaron 21 ovinos criollos enteros de 90 días de edad y 16,1 ± 4,1 kg de peso, distribuidos en tres tratamientos: T1 = solo pastoreo; T2 = pastoreo + BMN con 15 % de afrecho y 20 % de harina de hoja de yuca (BMNF1); T3 = pastoreo + BMN con 20 % de afrecho y 30 % de harina de hoja de yuca (BMNF2). Se caracterizó la composición nutricional de las materias primas, pasturas y BMN. Se evaluó la disponibilidad de forraje y el estatus sanitario mediante Famacha®, recuento de huevos por gramo (HPG) de heces y hematocrito. El consumo de materia seca se estimó utilizando óxido de cromo como marcador externo y la fibra detergente ácida indigerible (FDAi) como marcador interno. El desempeño animal se determinó a partir de la ganancia diaria de peso y la condición corporal. La calidad de la canal se evaluó mediante la determinación del peso de la canal caliente (PCC), peso de la canal fría (PCF) y el rendimiento en canal caliente y frío (RCC; RCF). Adicionalmente, se midió el pH a las 24 horas *post mortem* (pH24) y la composición tisular de la espalda tras disección. Finalmente, se realizó un análisis económico. La información se analizó mediante ANOVA bajo un diseño completamente al azar. Cuando se detectaron diferencias significativas ($p < 0,05$), las medias se compararon mediante la prueba de Tukey.

Resultados y conclusiones: El consumo de BMN se mantuvo similar entre los animales ($p > 0,05$), con un promedio de 128,5 $kg{\cdot}animal^{-1}{\cdot}día^{-1}$. Los ovinos suplementados con BMN registraron un mayor consumo

de materia seca total (CMST), alcanzando 1,127 y 0,895 kg·animal^{-1}·día^{-1}para los animales que recibieron BMNF1 (20HY–15AY) y BMNF2 (30HY–20AY), respectivamente. De igual forma, se evidenció un incremento ($p < 0,05$) en la ingestión de proteína cruda (0,160 y 0,130 kg·animal^{-1}·día^{-1}) siendo mayor en los animales suplementados con BMN en comparación con el grupo control (0,070 kg·animal^{-1}·día^{-1}). Los animales suplementados mostraron también las mayores ganancias de peso ($p < 0,05$) con 8,21 y 8,09 kg para BMNF1 (20HY–15AY) y BMNF2 (30HY–20AY), frente a 5,98 kg en el control. No se encontraron diferencias significativas en la calidad de la canal ni en la composición tisular. La suplementación con BMN generó mayores ingresos netos (5,12 y 5,40 $USD) en comparación con el control (2,18 $USD). En conjunto, la formulación BMNF2 (30HY–20AY) ofrece un balance más eficiente entre productividad y rentabilidad, convirtiéndose en la alternativa más recomendable para los productores de ovinos bajo condiciones tropicales.

Palabras clave: subproductos agroindustriales, suplementación, consumo de forraje, ganancia de peso, sostenibilidad alimentaria.

ABSTRACT

Context: In the Colombian Caribbean region, droughts affect the availability and quality of pasture, reducing the productivity of sheep production systems. Given this scenario, sustainable food strategies that minimize the impact of seasonality are required. An efficient alternative is the use of multi-nutritional blocks (BMN), made from agricultural by-products such as cassava leaves and cassava bran, which can provide essential nutrients for animal production.

Knowledge gap: although there is a growing interest in the region in using cassava crop by-products for animal feed, there is still a knowledge gap related to their effect on production parameters, health and carcass quality of creole sheep. Current information is limited and focuses mainly on animal response, making it difficult to formulate technical recommendations for its inclusion in BMN as a nutritional strategy in critical periods.

Objective: to evaluate the productive performance, health and economic viability of creole sheep supplemented with BMN based on cassava leaf meal and cassava bran.

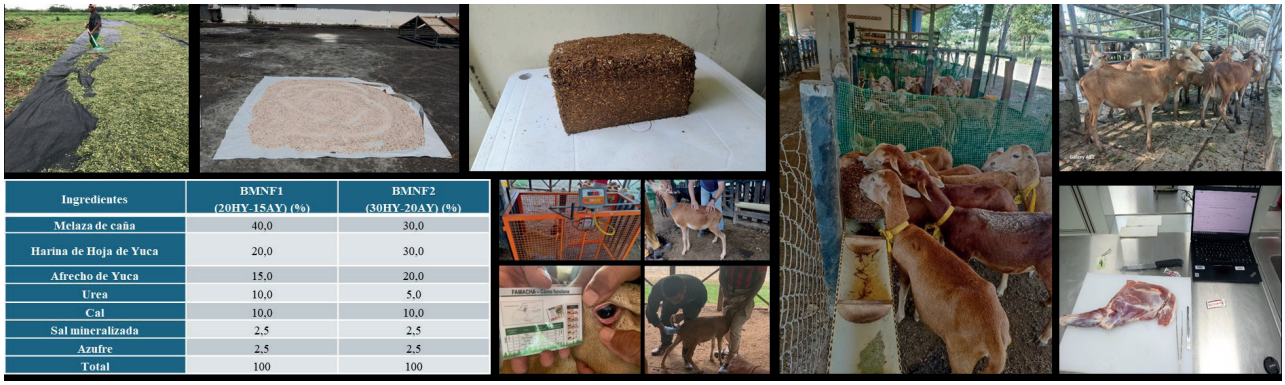
Methodology: the study was carried out at the Turipaná Research Center - El Carmen de Bolívar (AGROSAVIA) site, and it used twenty-one whole creole sheep, 90 days old and weighing 16.1 ± 4.1 kg, distributed in three treatments: T1 = grazing only; T2 = grazing + BMN with 15% bran and 20% cassava leaf meal (BMNF1); T3 = grazing + BMN with 20% bran and 30% cassava leaf meal (BMNF2). The nutritional composition of the raw materials, pastures and BMN was characterized. Forage availability and health status were evaluated using Famacha®, egg count per gram of feces (e.g., h.p.g.) and hematocrit. Dry matter intake was estimated using chromium oxide as an external marker and acid detergent indigestible fiber (ADFi) as an internal marker. Animal performance was determined from daily weight gain and body condition. Carcass quality was evaluated by determining hot carcass weight (PCC), cold carcass weight (PCF) and hot and cold carcass yield (RCC; RCF). Researchers also measured pH at 24 hours postmortem (pH24) and determined the tissue composition of the back after dissection. Finally, an economic analysis was performed. The information was analyzed by ANOVA under a completely randomized design. When significant differences were detected ($p < 0.05$), means were compared by Tukey's test.

Results and conclusions: BMN consumption remained similar among animals ($p > 0.05$), with an average of 128.5 kg·animal^{-1}·day^{-1}. Sheep supplemented with BMN recorded higher total dry matter intake (CMST), reaching 1,127 and 0.895 kg·animal^{-1}·day^{-1}for animals receiving BMNF1 (20HY–15AY) and BMNF2 (30HY–20AY), respectively. Similarly, there was an

observed increase ($p<0.05$) in crude protein intake (0,160 and 0,130 kg·animal^{-1}·day^{-1}), higher in animals supplemented with BMN compared to the control group (0,070kg·animal^{-1}·day^{-1}). The supplemented animals also showed the highest weight gains ($p<0.05$) with 8,21 and 8,09 kg for BMNF1 (20HY-15AY) and BMNF2 (30HY-20AY), compared to 5,98 kg in the control. No significant differences were found in carcass quality or tissue composition. BMN supplementation generated higher net income (US$5,12 and US$5,40) compared to the control (US$2,18). Overall, the BMNF2 (30HY–20AY) formulation offers a more efficient balance between productivity and profitability, making it the most recommended alternative for sheep producers under tropical conditions.

Keywords: agro-industrial by-products, supplementation, forage consumption, weight gain, feed sustainability

RESUMEN GRÁFICO



Ingredientes	BMNF1 (20HY-15AY) (%)	BMNF2 (30HY-20AY) (%)
Melaza de caña	40,0	30,0
Harina de Hoja de Yuca	20,0	30,0
Afrecho de Yuca	15,0	20,0
Urea	10,0	5,0
Cal	10,0	10,0
Sal mineralizada	2,5	2,5
Azufre	2,5	2,5
Total	100	100

Fuente: autores.

1 INTRODUCCIÓN

Las gramíneas son la principal fuente de alimentación para los ovinos en la región Caribe colombiana, debido a su bajo costo de producción (Suárez Paternina et al., 2025). Sin embargo, la productividad animal se ve afectada como consecuencia de la estacionalidad climática, caracterizada por periodos de lluvias intensas seguidos de sequías prolongadas, lo que reduce los rendimientos y calidad del forraje, a su vez el desempeño animal (Mestra-Vargas et al., 2022; Suárez Paternina et al., 2025). Una alternativa alimenticia para suplir el déficit de nutrientes es la suplementación con bloques multinutricionales (BMN), los cuales proporcionan energía, proteína y minerales para favorecer la fermentación ruminal y la digestión de la materia orgánica ingerida (Suárez Paternina et al., 2022).

Los BMN se pueden elaborar con subproductos de cultivos transitorios o de su procesamiento industrial, como también harinas del follaje de leguminosas arbustivas o de árboles (Suárez Paternina et al., 2022). Su efectividad depende de la selección de las materias primas nutricionalmente adecuadas y su disponibilidad en la región. Entre estos subproductos, el afrecho de yuca como resultado de la extracción de almidón de yuca puede emplearse en la alimentación de rumiantes; sin embargo el alto contenido de humedad y volúmenes de generación representan desafíos ambientales y económicos para la industria (costos de manejo, almacenamiento y transporte), por lo que es necesario implementar herramientas de innovación que ayuden a identificar tecnologías que permitan el aprovechamiento de este residuo, y con ello atenuar el impacto ambiental y reducir los gastos económicos.

En la región Caribe colombiana, el afrecho de yuca ha ganado relevancia como ingrediente en dieta de rumiantes debido a su bajo costo, contenido de fibra y energía. No obstante, el uso de este subproducto requiere de precaución, debido a la presencia de compuestos cianogénicos, potencialmente tóxicos en altas concentraciones. Por ello, es necesario optimizar su inclusión en dietas para aprovechar su valor nutricional y contribuir a sistemas de producción sostenibles, reduciendo tanto el impacto ambiental como los costos asociados a su producción. En este sentido, el objetivo del estudio fue evaluar el desempeño productivo, sanitario y viabilidad económica de ovinos criollos suplementados con bloques multinutricionales a base de harina de hoja y afrecho de yuca.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

Localización

El estudio se llevó a cabo en el Centro de Investigación Turipaná, sede El Carmen de Bolívar, perteneciente, a la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, Agrosavia, ubicada en el km 1 en la vía que conduce a Zambrano, Bolívar, Colombia; localizada a 125 m s. n. m., con Latitud Norte 9°43´06.0" y Longitud Este 75°06´16.5, zona agroecológica clasificada como bosque seco tropical (BsT), caracterizada por presentar una intensidad promedio mensual de brillo solar 234,5 h, temperaturas de 27,4 °C, humedad relativa del 72 % y precipitación media anual de 1.099 mm.

Área experimental y manejo animal

Se empleó un área de 10.000 m^2 para el pastoreo de los ovinos, establecida principalmente en pasto Guinea (*Megathyrsus maximus* cv. Agrosavia Sabanera) (85 %) y un 15 % en Colosuana (*Bothiochloa pertusa*). El área se dividió en 6 potreros de 1.666 m^2 con malla ovejera, con el fin de establecer un ciclo de pastoreo de 24 d (4 días de ocupación y 20 días de descanso). El sistema contó con agua permanente proporcionada por una red hidráulica con hidrantes surtidores. Los animales salían a pastoreo por la mañana (08:00h) y retornaban al aprisco por la tarde (16:00h), donde se separaban en tres tratamientos, para el suministro del BMN.

Animales experimentales

El ensayo tuvo una duración total de 137 días, incluyendo un periodo de adaptación de 10 días. El grupo experimental estuvo conformado por 21 corderos machos enteros provenientes de partos simples, con un peso promedio inicial de 16,1 ± 4,1 kg y aproximadamente 90 días de edad. Los animales se distribuyeron aleatoriamente entre los tratamientos, asignándose siete corderos por tratamiento y procurando mantener la homogeneidad en peso vivo y condición corporal. Los tratamientos evaluados fueron: T1: solo pastoreo (control); T2: pastoreo + BMN con inclusión de 20 % de harina de hoja de yuca

y 15 % de afrecho de yuca (BMNF1; 20HY–15AY); y T3: pastoreo + BMN con inclusión de 30 % de harina de hoja de yuca y 20 % de afrecho de yuca (BMNF2; 30HY–20AY) (Tabla 1).

Tabla 1.

Formulación de BMN con la inclusión de harina y afrecho de yuca para la suplementación de ovinos

Materias primas	BMNF1	BMNF2
	(20HY-15AY) (%)	(30HY-20AY) (%)
Melaza de caña	40,0	30,0
Harina de hoja de yuca	20,0	30,0
Afrecho de yuca	15,0	20,0
Urea	10,0	5,0
Cal	10,0	10,0
Sal mineralizada	2,5	2,5
Azufre	2,5	2,5
Total	**100**	**100**

Fuente: autores.

Variables

Caracterización nutricional de materias primas, pastura y BMN

Se colectaron muestras de las materias primas (harina del forraje y afrecho de la yuca) para su caracterización nutricional. Por cada materia prima se tomaron tres muestras de 500 g, las cuales fueron secadas y molidas. El procesamiento de las muestras se realizó en el Laboratorio de Nutrición Animal de Agrosavia, CI Turipaná, a través de análisis proximal, mientras que la calidad de la pastura se determinó a través de espectroscopía de infrarrojo cercano (NIRS) (Ariza-Nieto et al., 2018). Asimismo, se tomaron muestras de la mezcla compuesta de los BMN para determinar su composición nutricional.

Disponibilidad de forraje

Los rendimientos de forrajes de las praderas fueron estimados a través del método de disponibilidad por frecuencia propuesto por Franco et al. (2006) en el lote próximo a pastorear.

Estimación del consumo de materia seca

El consumo de materia seca (CMS) se estimó mediante marcadores, empleando óxido de cromo (Cr_2O_3) como marcador externo para estimar la producción de heces y la fibra detergente ácida indigerible (FDAI) como marcador interno para determinar la digestibilidad de la materia seca (Ferreira et al., 2009). Para estimar la producción de heces, el óxido de cromo (Cr_2O_3) se dosificó diariamente en cápsulas de gelatina de 1 g durante un periodo de 15 días, a 21 ovinos. Las cápsulas fueron administradas por vía oral a las 07:00 y 16:00 h. Durante los últimos cinco días de dosificación se recolectaron heces directamente de la ampolla rectal dos veces al día (08:00 y 16:00 h). Las muestras obtenidas de cada ovino se depositaron en recipientes de aluminio previamente identificados por animal y tratamiento, y se mantuvieron en refrigeración hasta completar el periodo de colecta. Posteriormente, las muestras se homogenizaron para conformar una muestra compuesta por animal, las cuales fueron secadas en una estufa de ventilación forzada a 60 °C durante 48 h y posteriormente molidas. La concentración de Cr en las heces se determinó mediante espectroscopia de absorción atómica con horno de grafito. Finalmente, la estimación de la producción fecal (g MS d^{-1}) se obtuvo dividiendo la cantidad de marcador administrado entre la concentración del mismo marcador cuantificada en las heces en el laboratorio (Ec. 1).

Producción fecal = (Dosis del marcador mg/g / Concentración del marcador mg/g (Ec.1).

Para determinar la fibra detergente ácida indigerible (FDAi) se siguió la metodología descrita por Ferreira et al. (2009). En concordancia con este procedimiento, se pesaron 0,5 g de las muestras compuestas de pasto y heces de cada animal y 1 g del suplemento, las cuales se empacaron por triplicado en bolsas de nailon. Posteriormente, las bolsas se incubaron durante 144 h en el rumen de un bovino canulado. Al finalizar este periodo, se retiraron, se lavaron con agua y se secaron a 60 °C durante 24 h. Los residuos obtenidos se sometieron a digestión en una solución de detergente ácido durante una hora y luego se lavaron con agua caliente y acetona. Tras el secado final, el residuo remanente se consideró como FDAi. Considerando los valores de FDAi se estimó la digestibilidad de la MS por medio de la ecuación (Ec.2) propuesta por Correa (2011).

DMS = 100 – 100 x (% de marcador en la MS del alimento) x (tasa de recuperación del marcador en las heces) / (% del marcador en la MS de las heces) (Ec. 2).

Finalmente, el CMS se determinó relacionando la producción de heces y la digestibilidad con base en la ecuación 3 sugerida por Ramírez et al. (2002). El consumo de BMN fue determinado mediante la oferta y sobrante diariamente.

Desempeño animal

Los animales se pesaron al inicio y cada 14 días hasta finalizar el ensayo, con báscula electrónica portátil. Los pesajes se realizaron de manera individual para obtener la ganancia de peso total (GDPT) y diaria de peso (GDP). Durante cada pesaje se evaluó el *score* corporal de los ovinos, utilizando una escala de 1 a 5, siguiendo la metodología propuesta por Felice (2011).

Valoración del estatus sanitario

Al inicio del estudio, los ovinos fueron desparasitados con Levamisol® HCL al 15 % (0,5 mg kg^{-1}) y posteriormente evaluados cada 14 días mediante la inspección de la mucosa conjuntival para determinar el grado de anemia, siguiendo la escala de coloración propuesta por el sistema Famacha® (Batch et al., 2001). Asimismo, se recolectaron muestras de heces para estimar la carga parasitaria mediante el recuento de HPG, utilizando la técnica de McMaster (Shapiro, 2010). De igual forma, se obtuvieron muestras de sangre por venopunción yugular para determinar el porcentaje de hematocrito mediante la técnica de microhematocrito.

Evaluación de la calidad de canal y composición tisular

Después de diecinueve horas de ayuno, los ovinos se insensibilizaron y se faenaron de acuerdo con los procedimientos operacionales de la planta de beneficio (Frigocer), según la normatividad propuesta en el decreto 1500 del 2007 (Ministerio de Protección Social, 2007). En la línea de faena, se evaluó la conformación muscular y la cobertura de tejido adiposo, con base en la metodología sugerida por Aguayo-Ulloa et al. (2022). Las canales completas fueron pesadas en caliente (PCC) y luego de permanecer 24 horas en cámara de frío a temperaturas de 2-4 °C se pesaron nuevamente para determinar el peso de la canal fría (PCF). El pH de las canales se midió a las 24 h *post mortem* (pH24) con un pH-metro (HANNA HI99163) entre los músculos *semitendinosus* y *biceps femoris*, teniendo en cuenta el método propuesto por Carter y Gallo (2008). El rendimiento de la canal caliente y fría se estableció con base en la relación entre el PCC y PCF sobre el peso al beneficio (PCC x 100)/PB y (PCFx100) / PB). Las pérdidas por refrigeración se determinaron mediante la siguiente ecuación (PCC-PCF/PCC)*100.

Para determinar la composición tisular se separó la espalda izquierda de cada ovino, teniendo en cuenta la metodología propuesta por Colomer-Rocher et al. (1988), abarcando la región escapular, braquial y antebraquial. Cada espalda se etiquetó con una identificación única, se envolvió en *film* alimentario y se congeló y almacenó a -20 °C hasta su disección. Tras la descongelación, se registró el peso total de la espalda. Se disecaron y pesaron por separado los componentes tisulares: músculo, grasa, hueso y otros tejidos (ganglios, tejido conectivo). La relación de cada componente se estableció con base en el peso total de la espalda.

Análisis económico

Para establecer la rentabilidad económica del uso de los BMN se tuvieron en cuenta los costos directos, los cuales estuvieron relacionados con la compra de las materias primas, elaboración y suplementación con BMN. En cambio, los ingresos fueron establecidos por la venta en pie de los animales. A partir de los costos directos e ingresos, se establecieron indicadores económicos, siguiendo la metodología de Agreda (1990), tales como: utilidad neta, rentabilidad, punto de equilibrio y el costo unitario de producción.

Análisis estadístico

Se realizó un análisis de varianza bajo un diseño completamente al azar para evaluar el efecto de la suplementación con BMN sobre el desempeño productivo, sanitario y viabilidad económica de ovinos criollos suplementados con bloques multinutricionales a base de harina de hoja y afrecho de yuca. La información se procesó mediante el procedimiento GLM del *software* estadístico SAS Enterprise Guide, versión 8.3. La comparación de medias entre tratamientos se efectuó mediante la prueba de Tukey, empleando un nivel de significancia del 5 %.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización nutricional

La tabla 2 presenta la caracterización nutricional de los subproductos del cultivo de yuca y de la pastura que se emplearon en la alimentación de los ovinos. En este sentido, el contenido de materia seca de la harina del forraje y afrecho de yuca fue de 93,13 % y 88,85 %, respectivamente. En cuanto al contenido de proteína cruda, se resalta el forraje de yuca, ya que presentó contenidos medios de PC del 19,46 %, mientras que el afrecho de yuca tuvo contenidos promedios de 1,43 %.

Desde el punto de vista estructural, la harina del forraje de yuca registró valores de FDN y FDA de 43,29 % y 33,53 %, respectivamente, mientras que el afrecho presentó niveles más bajos (23,17 % de FDN y 17,86 % de FDA). Estas diferencias son relevantes, dado que el contenido y la composición de la fibra determinan la ingestión voluntaria y la eficiencia de fermentación en el rumen. Valores elevados de FDN pueden limitar el consumo cuando superan el 50 % de la dieta, mientras que una FDA inferior al 30 % suele asociarse con una mayor degradabilidad del alimento (Correa, 2011 y Suárez Paternina et al., 2025).

Con base en las características estructurales, el forraje de yuca presentó una digestibilidad moderada (62,78 %) y un aporte energético de 2,26 Mcal/kg MS, mientras que el afrecho mostró una digestibilidad superior (74,99 %) y un mayor aporte de energía metabolizable (2,70 Mcal/kg MS). Esto coincide con reportes previos que señalan que el procesamiento industrial de la yuca mejora la disponibilidad de nutrientes y favorece la fermentación de carbohidratos en el rumen, debido a la reducción del tamaño de partícula

y al mayor contenido de almidones fácilmente degradables (Sudarman et al., 2023; Wanapat & Kang, 2015; Kongphitee et al., 2018 y Cabral et al., 2020).

Tabla 2.

Caracterización nutricional de subproductos del cultivo de yuca, BMN y pastura empleados en la alimentación de los ovinos

Materia prima	MS (%)	PC (%)	FDN (%)	FDA (%)	DIG (%)	EM (Mcal.kg/MS)
Harina de hoja de yuca	93,13±0,33	19,46±0,33	43,29±0,91	33,53±0,28	62,78±0,22	2,26±0,01
Afrecho de yuca seco	88,85±0,07	1,43±0,11	23,17±0,71	17,86±0,20	74,99±0,15	2,70±0,01
Pasto	31,24±4,44	11,59±0,22	68,25±0,47	38,62±9,99	56,6±0,49	1,82±0,02
BMNF1 (20HY-15AY)	81,07±0,12	22,78±0,29	19,98±2,44	13,35±0,23	78,50±0,18	2,83±0,01
BMNF2 (30HY-20AY)	86,10±0,17	18,52±1,49	26,20±2,20	17,57±0,50	75,21±0,39	2,71±0,01

MS: materia seca. PC: proteína cruda. FDN: fibra detergente neutra. FDA: fibra detergente ácida. DIG: digestibilidad de la materia seca. EM: energía metabolizable.

Fuente: autores.

A partir de las características nutricionales de las materias primas, los BMN mostraron contenidos de materia seca de 81,07 % y 86,10 %, respectivamente, para BMNF1-20HY-15AY y BMNF2-30HY-20AY. El BMN con inclusión de un 20 % y 15 % de harina de hoja y afrecho de yuca (BMNF1-20HY-15AY) registró mayores niveles de PC (22,78 %), energía metabolizable (2,83 Mcal/kg MS) y digestibilidad (78,50 %). En contraste, el BMN que incluyó un 30 % y 20 % de harina de hoja y afrecho de yuca (BMNF2-30HY-20AY) mostró valores medios de 18,52 % de PC, 2,71 Mcal/kg MS y 75,21 % de digestibilidad (Tabla 2). Estas diferencias están directamente asociadas con la proporción de hoja de yuca y afrecho incluidos en cada formulación, lo que evidencia que pequeñas modificaciones en la combinación de subproductos pueden influir en el aporte nutricional final. La pastura, por su parte, presentó valores de PC (11,59 %), energía (1,82 Mcal/kg MS) y digestibilidad (56,6 %), lo que indica su limitada capacidad para cubrir los requerimientos nutricionales de los animales. En este contexto, los BMN actúan como un complemento estratégico para mejorar el ambiente fermentativo, estimular el consumo y compensar las deficiencias de la base forrajera, estableciendo así una relación directa entre la calidad del suplemento y la respuesta productiva esperada en los animales.

Disponibilidad de forraje, consumo de BMN y nutrientes

Durante el periodo de evaluación, la disponibilidad de forraje de las praderas de *Megathyrsus maximus* cv. Agrosavia sabanera fue en promedio 1.735 ± 627 kg MS/ha. Esta oferta forrajera fue suficiente para sostener la carga animal de 21 animales/ha durante todo el ciclo experimental, garantizando una base nutricional homogénea sobre la cual evaluar los efectos de la suplementación.

A pesar de utilizar diferentes niveles de urea en las formulaciones, el consumo de BMN se mantuvo similar entre los animales ($p > 0,05$), con un promedio de 0,128 kg·animal^{-1}·día^{-1} (Tabla 3). Estos resultados son comparables a los reportados por Maza et al. (2016) en ovinos criollos tipo Sudán y por Vázquez-Mendoza et al. (2012) en corderos Pelibuey × Dorper, quienes registraron consumos entre 0,060 y 0,165 128 kg·animal^{-1}·día^{-1}. En contraste con los valores reportados por Cordão et al. (2014), quienes observaron una disminución del consumo de BMN conforme aumentaron los niveles de urea en los BMN (0,135, 0,112 y 0,080 kg·animal^{-1}·día^{-1} para inclusiones del 10 %, 15 % y 20 %), respectivamente. En el presente estudio no se evidenció este efecto. Las formulaciones utilizadas contuvieron 10 % y 5 % de urea en los tratamientos BMNF1 (20HY-15AY) y BMNF2 (30HY-20AY), respectivamente, sin que ello modificara el consumo voluntario. Tal como señalan Vázquez-Mendoza et al. (2012), la ingesta de BMN puede estar modulada por factores como la dureza del bloque, la calidad del forraje disponible, la época de suministro, el contenido de urea y el estado fisiológico de los animales. Al respecto, Mestra-Vargas et al. (2022) señalaron que dietas con mayor densidad nutricional optimizan el ambiente ruminal y estimulan la producción de ácidos grasos volátiles y proteína microbiana, elementos clave para el crecimiento y la síntesis de tejido muscular.

En cuanto al consumo de forraje, se observó una tendencia positiva ($p < 0,07$). Los animales suplementados con BMNF1 (20HY–15AY) y BMNF2 (30HY–20AY) registraron consumos medios de 0,992 y 0,753 kg·animal^{-1}·día^{-1}, respectivamente, valores superiores a los del grupo control, cuyo consumo fue de 0,597 kg·animal^{-1}·día^{-1} (Tabla 3). Este comportamiento podría estar asociado a la calidad composicional de los BMN y al consumo adicional de nutrientes (Tabla 2 y 3), lo cual favoreció la actividad microbiana y la tasa de degradación de la fibra, estimulando así una mayor ingesta de forraje. Al respecto, Mestra-Vargas et al., (2022) señalaron que dietas con mayor densidad nutricional optimizan el ambiente ruminal y estimulan la producción de ácidos grasos volátiles y proteína microbiana, elementos clave para el crecimiento y la síntesis de tejido muscular.

Con relación al consumo total de materia seca (CMST) se detectaron diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$). Los animales del tratamiento control registraron los menores consumos, mientras que los animales suplementados con BMNF1 (20HY–15AY) y BMNF2 (30HY–20AY) alcanzaron valores de 1,127 y 0,895 kg·animal^{-1}·día^{-1}, respectivamente. No obstante, entre estos dos tratamientos no se detectaron

diferencias estadísticas (p > 0,05) (Tabla 3). El bajo consumo observado en los animales del tratamiento control puede explicarse por el menor contenido de nutrientes y la baja digestibilidad de la pastura disponible. En este sentido, los animales del tratamiento control registraron consumos medios de PC de 0,070 kg·animal^{-1}·día^{-1}, significativamente inferior al observado por los animales que recibieron las formulaciones BMNF1 (20HY–15AY) y BMNF2 (30HY–20AY), los cuales registraron consumos de 0,160 y 0,130 kg·animal^{-1}·día^{-1}, respectivamente, sin diferencias entre sí. Estos resultados coinciden con estudios previos que indican que la concentración de proteína cruda en la dieta influye directamente en el consumo de nutrientes y en el rendimiento productivo de los ovinos (Huamán et al., 2023). Por su parte, Sánchez-López et al. (2025) señalaron que el papel principal de los BMN es proporcionar nitrógeno no proteico, el cual mejora el ambiente ruminal y contribuye con la multiplicación de los microorganismos, permitiendo una mayor degradabilidad y utilización eficiente del material fibroso (Robles et al., 2023).

Tabla 3.

Consumo de materia seca y proteína (kg·animal^{-1}·día^{-1}) en ovinos criollos suplementados con BMN

Consumo	Control	TTO		p	CV (%)
		BMNF1 (20HY-15AY)	BMNF2 (30HY-20AY)		
CBMN	-	0,128 a	0,129 a	0,9833	35,0
CMSF	0,597±0,14	0,992±0,24	0,753±0,24	0,0758	27,3
CMST	0,597±0,14 b	1,127±0,24 a	0,895±0,24 ab	0,0210	24,6
CPC	0,070±0,02 b	0,160±0,03 a	0,130±0,03 a	0,0020	20,9
CFDN	0,410±0,10 b	0,700±0,17 a	0,550±0,16 ab	0,0540	26,4

Letras diferentes en las filas indican diferencia estadística (p < 0,05). CBMN: consumo bloque multinutricional, CMSF: consumo de materia seca forraje, CMST: consumo de materia seca total, CPC: consumo de proteína cruda. CFDN: consumo de fibra detergente neutro.

Fuente: autores.

Desempeño productivo y sanitario

La respuesta favorable en los animales suplementados con BMN se puede asociar tanto con la calidad composicional de los bloques (Tabla 2), como con el mayor consumo de materia seca y nutrientes (Tabla 3). En este sentido, los animales suplemen-

tados con BMNF1 (20HY–15AY) y BMNF2 (30HY–20AY) alcanzaron ganancias totales de 8,21 y 8,09 kg durante el periodo experimental, equivalentes a ganancias diarias promedio (GDP) de 0,060 y 0,059 kg·animal^{-1}·día^{-1}, respectivamente. Estos valores difirieron de los observados en el grupo control, cuyos animales registraron una ganancia total de 5,98 kg y una GDP de 0,043 kg·animal^{-1}·día^{-1} (Tabla 4). La baja respuesta productiva de los ovinos que no fueron suplementados puede ser explicada por el bajo consumo de nutrientes (Tabla 3), que en el caso de este tratamiento fue dado por la pastura. Al respecto Suárez Paternina et al. (2019) y Mestra-Vargas et al. (2022) afirman que los ovinos cuando consumen solo forrajes y el valor nutricional de los mismos es de baja calidad, la ingestión de nutrientes puede resultar limitada para obtener ganancias de pesos aceptables.

En general, la ganancia diaria de peso registrada en los animales que recibieron BMN fue en promedio de 0,060 kg·animal^{-1}·día^{-1}, siendo semejantes a la reportada por Robles et al. (2023), quienes al valorar efecto de la suplementación con BMN en ovejas criollas bajo pastoreo reportaron ganancias de peso de 0,073 kg·animal^{-1}·día^{-1}. De igual forma, el desempeño productivo registrado por los animales que consumieron BMN se asemeja a los resultados notificados por Fernández et al. (1997), quienes al evaluar la ganancia de peso de corderos Corridale suplementados con BMN, registraron ganancias de 0,074 kg·animal^{-1}·día^{-1}, mientras que los animales que no recibieron suplementación presentaron ganancias de 0,050 kg·animal^{-1}·día^{-1}. Por su parte, Cordão et al. (2014) manifestaron ganancias de peso en ovinos y caprinos suplementados con BMN en pastoreo más suministro de heno de pasto buffel ganancias medias de 0,088 kg·animal^{-1}·día^{-1}, siendo superiores a la registradas en este estudio.

Tabla 4.

Desempeño productivo de ovinos criollos suplementados con BMN

TTO	GPP (kg)	GDP (kg)	CC (1-5)
Control	5,98±1,32 b	0,043±0,01 b	2,82±0,39 b
BMNF1 (20HY-15AY)	8,28±1,20 a	0,060±0,01 a	3,0±0,37 a
BMNF2 (30HY-20AY)	8,09±0,97 a	0,059±0,01 a	3,0±0,40 a
p	0,0027	0,0027	0,0025
CV (%)	15,72	15,72	13,30

Letras diferentes en las columnas indican diferencia estadística ($p<0.05$). GPP: ganancia de peso del periodo, GDP: ganancia diaria de peso, CC: condición corporal.

Fuente: autores.

En cuanto a la condición corporal de los animales (Tabla 4), se observaron diferencias significativas ($p < 0,0025$), destacándose que los ovinos suplementados con BMN presentaron un mejor engrasamiento, con un puntaje promedio de 3,0, el cual puede ser considerado óptimo para animales en crecimiento, y se relaciona con un adecuado estado nutricional y sanitario de los animales (Tablas 3 y 5). Por otro lado, los ovinos suplementados con BMNF1 (20HY–15AY) y BMNF2 (30HY–20AY) presentaron mejores indicadores sanitarios en comparación con el grupo control, reflejados en valores inferiores en la escala Famacha®, correspondientes a una coloración de la conjuntiva ocular grado 1 (rojo). Estos valores difirieron significativamente ($p < 0,05$) de los observados en el grupo control, cuyos animales mostraron una coloración grado 2 (rojo-pálido) y una tendencia a tener una mayor carga parasitaria (HPG), (Tabla 5). Sin embargo, para el recuento de hematocrito no se evidenció un efecto significativo de la suplementación con BMN ($p > 0,05$), registrándose valores promedio de 34 %, los cuales se encuentran dentro de los rangos de referencia para la especie (Yaguna-Guerra, 2020 y Rodríguez-Díaz et al. 2024). Los anteriores resultados pueden atribuirse al aporte adicional de energía y proteína proporcionado por los bloques multinutricionales, el cual contribuyó al fortalecimiento de la respuesta inmunológica de los ovinos y a mejorar su capacidad para tolerar el parasitismo. Estos hallazgos son consistentes con lo reportado por Torres-Acosta et al. (2021), quienes indicaron que la mejora del plano nutricional constituye una estrategia oportuna para incrementar la resiliencia de los ovinos frente a nematodos gastrointestinales, los cuales pueden generar impactos negativos sobre el desempeño productivo, causar anemia, disminuir el consumo de materia seca, provocar pérdidas de peso y aumentar la susceptibilidad a otras enfermedades, lo que se traduce en pérdidas económicas para los sistemas de producción (Reyes-Guerrero et al., 2021; Arauco Villar et al., 2021).

Tabla 5.

Efecto de la suplementación con BMN sobre parámetros de Famacha®, HTO y HPG en ovinos

TTO	Famacha®(1-5)	HTO (%)	HPG
Control	2,0±0,69 b	33,0±6,34 a	727,27±1,144 a
BMNF1 (20HY-15AY)	1,0±0,54 a	34,9±5,46 a	416,67±709 a
BMNF2 (30HY-20AY)	1,0±0,45 a	33,1±7,13 a	327,42±382 a
p	0,0001	0,5750	0,1225
CV (%)	38,82	18,74	20,11

Letras diferentes en las columnas indican diferencia estadística ($p<0.05$).
HTO: hematocrito, HPG: huevos por gramo de heces.

Fuente: autores.

Evaluación de la calidad de canal y composición tisular

En lo que respecta a las variables de calidad de canal, el análisis no detectó efecto significativo ($p > 0,05$) de la suplementación con BMN, ya que se registraron valores promedios de 10,68 kg, similares entre los tratamientos (Tabla 6). El pH de las canales osciló entre 5,4 y 5,5 indicando que los ovinos no sufrieron un nivel de estrés previo al beneficio. Los anteriores resultados están dentro de los valores notificados por Aguayo-Ulloa et al., (2022).

Tabla 6.

Calidad de canal de ovinos criollos suplementados con BMN

Variable	Control	TTO		p	CV (%)
		BMNF1 (20HY-15AY)	BMNF2 (30HY-20AY)		
PCC (kg)	10,04±1,72	11,36±1,13	10,64±2,10	0,4913	15,93
RCC (%)	41,26±1,20	40,18±0,78	41,12±1,20	0,5540	4,08
PCF (kg)	8,96±1,69	10,28±1,30	9,64±1,91	0,4719	17,14
RCF (%)	36,7±1,54	36,28±0,99	37,22±2,56	0,7209	4,94
PR (%)	11,0±1,93	9,70±2,75	9,42±3,37	0,6089	26,11
pH	5,48±0,14	5,53±0,08	5,50±0,30	0,9007	3,53
Músculo (%)	62,36 ± 4,0	61,76 ± 1,7	62,40 ± 4,6	0,9544	5,96
Grasa (%)	6,50 ± 3,3	6,54 ± 1,6	6,40 ± 2,0	0,9957	37,79
Hueso (%)	25,82 ± 1,8	24,60 ± 1,5	24,64 ± 3,2	0,6529	9,32
Otros (%)	4,26 ± 0,8	5,02 ± 1,2	4,32 ± 1,3	0,5381	25,79

PCC: peso canal caliente, RCC: rendimiento canal caliente, PCF: peso canal fría, RCF: rendimiento canal fría, PR: pérdidas por refrigeración.

Fuente: autores.

En general, las canales presentaron altas pérdidas por refrigeración; sin embargo, las canales del tratamiento control fueron las que registraron las mayores pérdidas, las cuales pueden estar relacionadas posiblemente con la menor condición corporal de

los animales. Al respecto, diferentes autores han manifestado que las pérdidas en refrigeración están relacionadas con la cobertura de la grasa, registrando las canales con menor cobertura de grasa subcutánea como las que registran las mayores pérdidas (Queiroz et al., 2015 y Suárez-Paternina et al., 2020). De acuerdo con lo anterior, Aguayo-Ulloa et al. (2022) mencionaron que las pérdidas por refrigeración pueden oscilar entre el 1 % y el 7 %, y dependen del sistema de alimentación, el sexo, el peso, la temperatura y la humedad relativa de la cámara de frío. El porcentaje de pérdida por refrigeración reportado en el presente estudio es similar al indicado por Suárez-Paternina et al. (2020), quienes al evaluar el efecto de la suplementación energético proteico con subproductos agroindustriales en ovinos criollos reportaron valores medios del 11 %; sin embargo, contrastan con los reportados por Aguayo-Ulloa et al. (2022), quienes al caracterizar la canal de ovinos criollos indicaron valores medios de 6,46 %.

La suplementación con bloques BMN no generó cambios sustanciales en la composición tisular de la canal, siendo similar a la registrada por la del grupo control (Tabla 6). El porcentaje de músculo, principal componente de interés en la calidad de canal se mantuvo constante ($p > 0,05$) entre los tratamientos, siendo en promedio de 62,1 %. De igual forma, para el contenido de grasa, proporción de hueso y otros componentes, no se detectó efecto significativo de la suplementación con BMN, ya que se registraron valores medios de 6,54 %, 25,0 % y 4,5 %, respectivamente. La proporción de músculo registrada en este estudio coincide con los resultados reportados por Aguayo-Ulloa et al. (2022), quienes al caracterizar la calidad de la canal de ovinos criollos de pelo indicaron una proporción de músculo, grasa, hueso y otros componentes del 63,0 %, 8,0 %, 21,3 % y 7 %, respectivamente. Sin embargo, contrastan con los valores registrados por Coronel-Burgos et al. (2017), quienes indicaron proporciones medias de músculo, grasa y hueso de 67 %, 16 % y 18 %, respectivamente, en ovinos mestizos (¾ Kathadin × ¼ Pelibuey), mucho mejores a las reportadas en este estudio y obedecen al grupo racial, como también a un mejor plano nutricional donde la suplementación energético-proteica tiende a favorecer la síntesis de tejido muscular sobre el óseo.

Costos y análisis económico

De acuerdo con las formulaciones, se estimaron las cantidades necesarias de cada materia prima para la elaboración de los BMN y a partir de los costos de producción o comerciales de estas materias primas, se determinó el costo unitario por kilogramo de los BMN utilizados en la suplementación de los ovinos. En este sentido, el costo por kilogramo de los BMN fue de $USD 0,566 y $USD 0,529, respectivamente, para BMNF1 (20HY-15AY) y BMNF2 (30HY-20AY), valores que estuvieron directamente relacionados con el nivel de inclusión y los costos de las materias primas. Mientras que en el tratamiento control registró un costo de $USD 0,67, representado por el consumo y suministro diario de suplemento mineral.

Considerando el consumo diario de los ovinos y el costo unitario por kilogramo de

cada tipo de suplemento (BMN), se estimó el costo total de suplementación durante el periodo evaluado (Tabla 7). En este contexto, los ovinos suplementados con el BMNF1 (20HY–15AY) registraron el mayor costo acumulado, alcanzando $USD 9,92 por animal. Les siguieron los ovinos suplementados con el BMNF2 (30HY–20AY), con un gasto de $USD 9,36 por animal. En contraste, los animales del tratamiento control presentaron el menor costo durante el periodo, con un total de $USD 8,66 por animal.

A pesar de que los animales del tratamiento control registraron los menores costos de suplementación, fueron los ovinos suplementados con BMN los que generaron los mayores ingresos netos (Tabla 7). Estos resultados se explican principalmente por el mejor desempeño productivo, el cual estuvo directamente influenciado por el mayor consumo de materia seca y de nutrientes. En consecuencia, las mayores ganancias de peso registradas por los animales suplementados con BMN se tradujeron en mayores ingresos, no obstante, los ingresos netos registrados en el tratamiento BMNF2 (30HY-20AY) fueron ligeramente superiores a los observados en el tratamiento BMNF1 (20HY-15AY) en 5 % y aproximadamente en un 60 % con relación al tratamiento control. Estos hallazgos indican además que la suplementación, aunque implica un costo ligeramente mayor, ofrece una mejor rentabilidad, la cual fue notablemente más alta en los tratamientos con BMN, especialmente en BMNF2 (30HY-20AY), que alcanzó 57,74 %, seguido de BMNF1 (20HY-15AY) con un 51,63 %, mientras que el control registró solo 25,12 % de rentabilidad (Tabla 7).

Por otra parte, el punto de equilibrio fue ligeramente mayor en los animales suplementados con BMN con relación con el tratamiento control, debido al mayor costo empleado en la alimentación. A pesar de que en todos los tratamientos los animales superaron ampliamente el punto de equilibrio, demuestra que la producción fue rentable, siendo más eficiente en los tratamientos con BMN, ya que lograron mayores ganancias de peso con menores costos por kilogramo producido (Tabla 7).

Tabla 7.

Costos y análisis económico de la suplementación con BMN en ovinos

Ítem	Control	TTO	
		BMNF1 (20HY-15AY)	BMNF2 (30HY-20AY)
Consumo BMN kg.animal.d	0,017*	0,128	0,129
Costo unitario (kg) ($USD)	0,67	0,566	0,529
Costo alimentación animal.d ($USD)	0,063	0,072	0,068
Días experimentales	137	137	137
Total costos ($USD)	8,66	9,92	9,36

Ítem	Control	TTO	
		BMNF1 (20HY-15AY)	BMNF2 (30HY-20AY)
Peso inicial (Kg)	15,91	16,2	16,36
Peso final (Kg)	21,89	24,5	24,5
Ganancia de peso periodo (kg)	5,98	8,30	8,14
Costo de comercialización Kg en pie ($USD)	1,81	1,81	1,81
Ingreso bruto ($USD)	10,84	15,05	14,76
Ingreso neto ($USD)	2,18	5,12	5,40
Rentabilidad (%)	25,12	51,63	57,74
Punto de equilibrio (kg)	4,8	5,5	5,2
Costo de producción kg en pie ($USD)	1,45	1,20	1,15

**Ración diaria de suplemento mineral. Tasa representativa del dólar ($USD 3,861), Banco de la República de Colombia.*

Fuente: autores.

En general, la suplementación con BMN generó un efecto sinérgico en los ovinos, mejorando de manera conjunta el consumo de nutrientes, el desempeño productivo, el estado sanitario y la rentabilidad del sistema. El mayor aporte de nutrientes optimizó la fermentación ruminal y estimuló una mayor ingestión de materia seca, lo que se reflejó en mayores ganancias de peso y mejores indicadores sanitarios. Integralmente, el uso de BMN se tradujo en mayores ingresos netos y rentabilidad y en producir a un menor costo la unidad de producto, demostrando que la suplementación con BMN constituye una estrategia integral capaz de fortalecer simultáneamente la eficiencia alimenticia, el bienestar animal y la sostenibilidad económica del sistema productivo. Sin embargo, es importante señalar que los resultados obtenidos son prometedores bajo las condiciones del presente estudio, pero su aplicación a gran escala requiere validar la respuesta productiva y sanitaria en diferentes contextos de producción, dependiendo de la disponibilidad de insumos, la oferta forrajera y las condiciones de manejo propias de cada territorio

4 CONCLUSIONES

Apesar de que las formulaciones empleadas BMNF1 (20HY-15AY) y BMNF2 (30HY-20AY) mejoraron significativamente el consumo de nutrientes y la ganancia de peso, respecto al tratamiento control, la formulación que incluyó un 30 % de harina

de hoja de yuca y un 20 % de afrecho de yuca (BMNF2-30HY-20AY) expuso un mayor beneficio económico, reflejado por un mayor ingreso neto y mejor rentabilidad, además fue el que incurrió en menos gastos para producir una unidad de producto. En conjunto, estos resultados indican que el BMNF2 (30HY-20AY) ofrece un balance más eficiente entre productividad y rentabilidad, convirtiéndose en la alternativa más recomendable para los productores ovinos, bajo condiciones tropicales.

Desde una perspectiva de sostenibilidad, el uso de subproductos de la yuca para la elaboración de los BMN promueve la economía circular al transformar residuos agroindustriales en insumos de alto valor nutricional, reduciendo costos y contribuyendo a la mitigación del impacto ambiental asociado a su disposición.

CONTRIBUCIÓN DE LA AUTORÍA

Autor 1: ideación, formulación, montaje del ensayo, evaluación en campo, análisis de información, redacción y discusión de los resultados.

Autor 2: evaluación en campo, digitación y preparación de bases de datos, búsqueda de información, contribución en la redacción y discusión de los resultados.

Autor 3: evaluación en campo, digitación y preparación de bases de datos, búsqueda de información, contribución en la redacción y discusión de los resultados.

Autor 4: evaluación en campo, contribución en la redacción y discusión de los resultados.

Autores 5 y 6: contribución en la redacción y discusión de los resultados.

AGRADECIMIENTOS

Al Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación por permitir la participación de la Universidad del Cauca y Agrosavia en la Convocatoria 903-2021, contribuyendo al fortalecimiento de la Misión Bioeconomía.

FINANCIAMIENTO

Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación. Programa 85717 - Fortalecimiento de la red de valor de la yuca en Colombia mediante coinnovación en producción primaria, transformación, y acceso a mercados con criterios de sostenibilidad, competitividad y circularidad; proyecto 87064. Aprovechamiento integral de la biomasa de la yuca para optimizar la circularidad y minimizar la contaminación de su agroindustria. De igual forma, al Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural.

USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

No aplica.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

LITERATURA CITADA

Agreda, V. (1990). *Metodología para análisis económico de sistemas de producción*. Rispal.

Aguayo-Ulloa, L. A., Rua-Bustamante, C. V., Suárez-Paternina, E. A. y Ríos-de-Álvarez, L. (2022). Caracterización de la canal de ovinos sacrificados en una planta frigorífica de Córdoba, Colombia. *Agronomía Mesoamericana, 33*(1), 44572. https://dx.doi.org/10.15517/am.v33i1.44572

Arauco Villar, F., Uchupaica Payano, I., Mayorga Sánchez, N. y Cruz Flores, D. (2021). Asociación de parasitismo gastrointestinal con parámetros fisiológicos en ovinos mejorados de la región Junín, Perú. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú, 32*(6), e21677. https://doi.org/10.15381/rivep.v32i6.21677

Ariza-Nieto, C., Mayorga, O. L., Mojica, B., Parra, D. & Afanador-Tellez, G. (2018). Use of LOCAL algorithm with near infrared spectroscopy in forage resources for grazing systems in Colombia. *Journal of Near Infrared Spectrosccopy, 26*(1), 44-52. http://doi.org/10.1177/0967033517746900

Batch, G., Hansen, J., Krecek, R., Van Wyk, J., & Vatta, A. (2001). *Sustainable approaches for managing haemonchosis in sheep and goats* (Final report of F.A.O Technical Cooperation in Africa, Project No. TCP/SAF/8821(a)). FAO.

Cabral, Í. D. S., Oliveira, S. S., Azêvedo, J. A. G., Souza, L. L., Lima, R. F. D., Lopes, C. D. Otani, F. S., Reis, F. M., Sousa, C. A. F. D. (2020). Ruminal fermentation kinetics of by-products using the semi-automatic technique of in-vitro gas production. *Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal, 21*. https://doi.org/10.1590/s1519-99402121242020

Carter, L. M. y Gallo, C. B. (2008). Efectos del transporte prolongado por vía terrestre y cruce marítimo en transbordador sobre pérdidas de peso vivo y características de la canal en corderos. *Archivos de Medicina Veterinaria, 40*(3), 259-266. https://doi.org/10.4067/s0301-732x2008000300006

Colomer-Rocher, F., Morand-Fehr, P., Kirton, A. H., Delfa, R. ySierra-Alfranca, I. (1988). *Métodos normalizados para el estudio de los caracteres cuantitativos y cualitativos de las canales caprinas y ovinas*. Instituto Nacional de Innovación Agraria.

Cordão, M. A., Cezar, M. F., Cunha, M. G. G., Sousa, W. H., Filho, J. M., Lins, Menezes J. B. A., Nóbrega, G. H. (2014). Efeito da suplementação com blocos multinutricionais sobre o desempenho e características de carcaça de ovinos e caprinos na Caatinga. *Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia, 66*(6), 1762-1770. https://doi.org/10.1590/1678-7169

Coronel-Burgos, F., Plascencia, A., Castro-Pérez, B. I., Contreras-Pérez, G., Barreras, A. y Estrada-Angulo, A. (2017). Influencia de la sustitución parcial del maíz y de la pasta de soja por zeolita en ovinos en etapa de finalización: Características de la canal, composición tisular y masa visceral. *Archivos de Zootecnia, 66*(254), 223-228.

Correa, H. J. (2011). *Efecto del manejo del pastoreo y la suplementación alimenticia en vacas lactantes de sistemas especializados sobre su metabolismo energético y proteico y el contenido de proteína en la leche* [Tesis doctoral, Universidad Nacional de Colombia]. https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/8605

Felice, M. (2011). Condición corporal de ovinos. INTA – Estación Experimental Agropecuaria Alto Valle.

Fernández, G., San Martín, F. y Escurra, E. (1997). Uso de bloques nutricionales en la suplementación de ovinos al pastoreo. *Revista de Investigación Pecuaria IVITA, 8*(1), 29-38. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://sisbib.unmsm.edu.pe/BVRevistas/veterinaria/v08_n1/pdf/a04.pdf

Ferreira, M. A., Valadares Filho, S. C., Marcondes, M. I., Paixão, M. L., Paulino, M. F., & Valadares, R. F. D. (2009). Avaliação de indicadores em estudos com ruminantes: digestibilidade. *Revista Brasileira de Zootecnia, 38(*8), 1568-1573. https://doi.org/10.1590/S1516-35982009000800022

Franco, L. H., Calero, D. y Durán, C. V. (2006). *Manejo y utilización de forrajes tropicales multipropósito*. CIAT – Universidad Nacional de Colombia.

Huamán, M., Olazábal-Loaiza, J. y San Martín, F. (2023). Proteína cruda de la dieta y nitrógeno ureico sanguíneo en alpacas y ovejas. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú, 34*(1), e24617. https://doi.org/10.15381/rivep.v34i1.24617

Kongphitee, K., Sommart, K., Phonbumrung, T., Gunha, T., & Suzuki, T. (2018). Feed intake, digestibility and energy partitioning in beef cattle fed diets with cassava pulp instead of rice straw. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences, 31*(9), 1431-1441. https://doi.org/10.5713/ajas.17.0759

Maza Ángulo, L., Villa Arrieta, S., Vergara Rodríguez, H., Bustamante Yánez, M., Simanca Sotelo, J., Alemán Romero, A., & Vergara Garay, O. (2016). Weight gain and carcass yield in sheep supplemented with multinutrient blocks in transition

period dry-rainy season. *Revista Colombiana de Ciencia Animal – RECIA, 8*(1), 65-71. https://doi.org/10.24188/recia.v8.n1.2016.224

Mestra-Vargas, L., Santana-Rodríguez, M. y Aguayo-Ulloa, L. (2022). Respuesta productiva de corderos suplementados con oleaginosas en condiciones de Caribe Húmedo colombiano. *Nutrición Animal Tropical, 16*(1), 1-30. https://archivo.revistas.ucr.ac.cr//index.php/nutrianimal/article/download/50178/50156?inline=1

Ministerio de Protección Social. (2007). *Decreto Número 1500 de 2007*. https://es.scribd.com/document/313492399/DECRETO

Queiroz, L. de O., Santos, G. R. de A., Macêdo, F. de A. F., Mora, N. H. A. P., Torres, M. G., Santana, T. E. Z. y Macêdo, F. G. de. (2015). Características quantitativas da carcaça de cordeiros Santa Inês abatidos com diferentes espessuras de gordura subcutânea. *Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal, 16*(3), 712-722. https://doi.org/10.1590/S1519-99402015000300021

Ramírez-Pérez, A. H., Buntinx, S. E., Tapia-Rodríguez, C., & Rosiles, R. (2000). Effect of breed and age on the voluntary intake and the micromineral status of non-pregnant sheep. 1. Estimation of voluntary intake. *Small Ruminant Research, 37*(3), 223-229. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921448899001418

Reyes-Guerrero, D. M., Olmedo-Juárez, A. y Mendoza-de Gives, P. (2021). Control y prevención de nematodosis en pequeños rumiantes: antecedentes, retos y perspectivas en México. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias, 12*(Supl. 3), 186-204. https://doi.org/10.22319/rmcp.v12s3.5840

Robles R. S., García L. I. I. G., Sánchez L. R., Burgos W., & Margarito L. A. (2023). Supplementation of creole sheep with multinutritional blocks in Tlaxcala, Mexico. *Journal of Agricultural Sciences Research*. https://doi.org/10.22533/at.ed.9733723300510

Rodríguez-Díaz, D. L., González-Garduño, R., García-Herrera, R. A., Chaves-Gurgel, A. L., Muñoz-Osorio, G. A. y Chay Canul, A. J. (2024). Parámetros hematológicos de ovejas Pelibuey adultas bajo condiciones del trópico húmedo de México. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú, 35*(2), e26139. https://doi.org/10.15381/rivep.v35i2.26139

Sánchez-López, N., Mendoza-Martínez, G. D., de la Torre-Hernández, M. E., Hernández-García, P. A., Díaz-Galván, C., Ortega-Navarro, G. C., Fuentes Ponce, M. H., Leal-González, A. J., López Ridaura, S., Van Loon, J. (2025). Impact of Feeding Level and Multi-Nutrient Blocks with Polyherbals on Weight Changes and Greenhouse Gas Emissions in Lambs. *Animals, 15*(17), 2541. https://doi.org/10.3390/*ani15172541*

Shapiro, L. S. (2010). Important techniques for veterinary technicians. In L. S. Shapiro (Ed.), *Pathology & parasitology for veterinary technicians* (2nd ed., 223-241). Delmar Cengage Learning.

Suárez Paternina, E. A., Maza Angulo, L. A., Barragán Hernández, W. A., Patiño Pardo, R. M., Vergara Garay, O. D. y Aguayo Ulloa, L. A. (2019). Comportamiento ingestivo diurno y desempeño productivo de corderos suplementados con semilla de algodón y maíz molido. *Revista Medicina Veterinaria*, *39,* 63-74. https://doi.org/10.19052/mv.vol1.iss39.7

Suárez-Paternina, E., Maza-Angulo, L., Aguayo-Ulloa, L., Vergara-Garay, O., Barragán-Hernández, W. y Bustamante-Yánez, M. (2020). Efecto de la suplementación con semilla de algodón y maíz en el desempeño productivo y calidad de la carne de ovinos. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, *23*(2), e1604. https://doi.org/10.31910/rudca.v23.n2.2020.1604

Suárez Paternina, E. A., Mestra Vargas, L. I., Paternina Paternina, Y., Salcedo Carrascal, E. P., Luna Castellanos, L. L. y Araújo Vásquez, H. A. (2022). *Yuca para la alimentación animal en la región Caribe: manejo, conservación y uso eficiente*. Agrosavia.

Suárez Paternina, E., Paternina Paternina, Y., Atencio Solano, L., Tapia Coronado, J. J., Barragán Hernández, W., & Mestra Vargas, L. (2025). Effect of corn and cassava silage on the economic and productive performance of hair creole sheep (Ovis aries). *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías, 17*(2). https://doi.org/10.18272/aci.vi.3748

Sudarman, A., Ananda, A., Pangestu, R., & Khotijah, L. (2023). The effect of different energy sources on the performance and blood metabolites of sheep. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1208, 012060. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1208/1/012060

Torres-Acosta, J. F. J., Sandoval-Castro, C. A., González-Pech, P. G., Mancilla-Montelongo, M.G., Ortega-Pacheco, A., Aguilar-Caballero, A. J., Santos-Ricalde, R. H., Sarmiento-Franco, L. A., Ramos-Bruno, E., Torres-Fajardo, R. A., Méndez-Ortiz, F. A. (2021). Interacción entre lanutrición y los nematodos gastrointestinales en pequeños rumiantes pastoreando la selva baja caducifolia. *Tropical and Subtropical Agroecosystems, 24*(3),1-18.

Vázquez-Mendoza, P., Castelán-Ortega, O. A., García-Martínez, A. y Avilés-Nova, F. (2012). Uso de bloques nutricionales como complemento para ovinos en el trópico seco del altiplano central de México. *Agroecosistemas Tropicales y Subtropicales*, *15*(1), 87-96. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.redalyc.org/pdf/939/93924483008.pdf

Wanapat, M., & Kang, S. (2015). Cassava chip (*Manihot esculenta* Crantz) as an energy source for ruminant feeding. *Animal Nutrition*, *1*(4), 266-270. https://doi.org/10.1016/j.aninu.2015.12.001

Yaguna Guerra, C. J. (2020). *Estimación de parámetros hematológicos en corderos (Ovis aries) de pelo, durante la fase de cría en Córdoba* [Tesis de pregrado, Universidad de Córdoba]. Repositorio Universidad de Córdoba. https://repositorio.unicordoba.edu.co/server/api/core/bitstreams/bc52459a-9b95-462a-be47-6212a4fad632/content

Conflicto de intereses
Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Licencia de Creative Commons
Revista de Investigación Agraria y Ambiental is licensed under a Creative Commons Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual 4.0 Internacional License.

Fecha de recibido: 23-04-2025
Fecha de aceptado: 20-02-2026
DOI: 10.22490/21456453.9781

CAPACIDAD FUNCIONAL DE BACTERIAS SOLUBILIZADORAS DE FOSFATO AISLADAS DE SUELOS CULTIVADOS CON *ELAEIS GUINEENSIS*

FUNCTIONAL CAPACITY OF PHOSPHATE-SOLUBILIZING BACTERIA ISOLATED FROM SOILS CULTIVATED WITH *ELAEIS GUINEENSIS*

Karen Margarita Cotes Solano[1]

Luz Elena Márquez Jiménez[2]

Carla Cecilia Bolaños Contreras[3]

Juan Carlos Prada Herrera[4]

Citación: Cotes Solano, K. M., Márquez Jiménez, L. E., Bolaños Contreras, C. C. y Prada Herrera, J. C. (2026). Capacidad funcional de bacterias solubilizadoras de fosfato aisladas de suelos cultivados con Elaeis guineensis. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental, 17*(2), 229-246. https://doi.org/10.22490/21456453.9781

[1] Estudiante de pregrado de microbiología, Universidad Popular del Cesar, Valledupar, Colombia. kmargaritacotes@unicesar.edu.co

[2] Estudiante de pregrado de microbiología, Universidad Popular de Cesar, Valledupar, Colombia. lemarquez@unicesar.edu.co

[3] Magíster en Gerencia de Proyectos de Investigación y Desarrollo, Docente de la Universidad Popular del Cesar, Valledupar, Colombia. carlaceciliaabc@gmail.com

[4] Magíster en Microbiología, Docente de la Universidad Popular del Cesar, Valledupar, Colombia. juanprada@unicesar.edu.co

RESUMEN

Contextualización: Las bacterias solubilizadoras de fosfato son importantes en los suelos agrícolas para la transformación del fósforo insoluble en formas asimilables por las plantas, mejorando su fertilidad, la eficiencia en el uso de fertilizantes y la sostenibilidad de los sistemas productivos. El fósforo es un nutriente esencial para el desarrollo vegetal; sin embargo, en muchos suelos agrícolas se encuentra en formas poco disponibles, lo que limita su absorción en cultivos de importancia económica como la palma africana (*Elaeis guineensis*).

Vacío de conocimiento: En el departamento del Cesar, donde este cultivo tiene alta relevancia económica, existe escasa información sobre la diversidad y el potencial funcional de las BSF presentes en la rizósfera, lo que restringe el desarrollo de biofertilizantes adaptados a condiciones locales.

Propósito: El objetivo fue aislar, identificar y caracterizar bacterias solubilizadoras de fosfato en suelos cultivados con palma africana en el Cesar, evaluando su capacidad de producción de ácidos orgánicos.

Metodología: Se recolectaron 30 muestras de suelo rizosférico en cinco plantaciones comerciales. Las bacterias se aislaron en medio selectivo con fosfato insoluble y se evaluó su índice de solubilización. La identificación se realizó mediante amplificación del gen 16S rRNA y el perfil de ácidos orgánicos se determinó por cromatografía líquida de alta resolución.

Resultados y conclusiones: Se aislaron nueve cepas con alta capacidad solubilizadora, identificándose *Pseudomonas fluorescens, Bacillus subtilis, Enterobacter cloacae y Burkholderia cepacia*, esta última no reportada previamente en el Cesar. Las cepas produjeron ácido glucónico, cítrico y oxálico, evidenciando su potencial para el desarrollo de biofertilizantes regionales.

Palabras clave: ácidos orgánicos, biodiversidad microbiana, cromatografía líquida, microbiología del suelo, palma africana, rizósfera.

ABSTRACT

Contextualization: Phosphate-solubilizing bacteria are important in agricultural soils for the transformation of insoluble phosphorus into forms that can be assimilated by plants, improving fertility, fertilizer use efficiency and the sustainability of production systems. Phosphorus is an essential nutrient for plant growth; however, in many agricultural soils it is found in poorly available forms, which limits its uptake in economically important crops such as African palm (*Elaeis guineensis*).

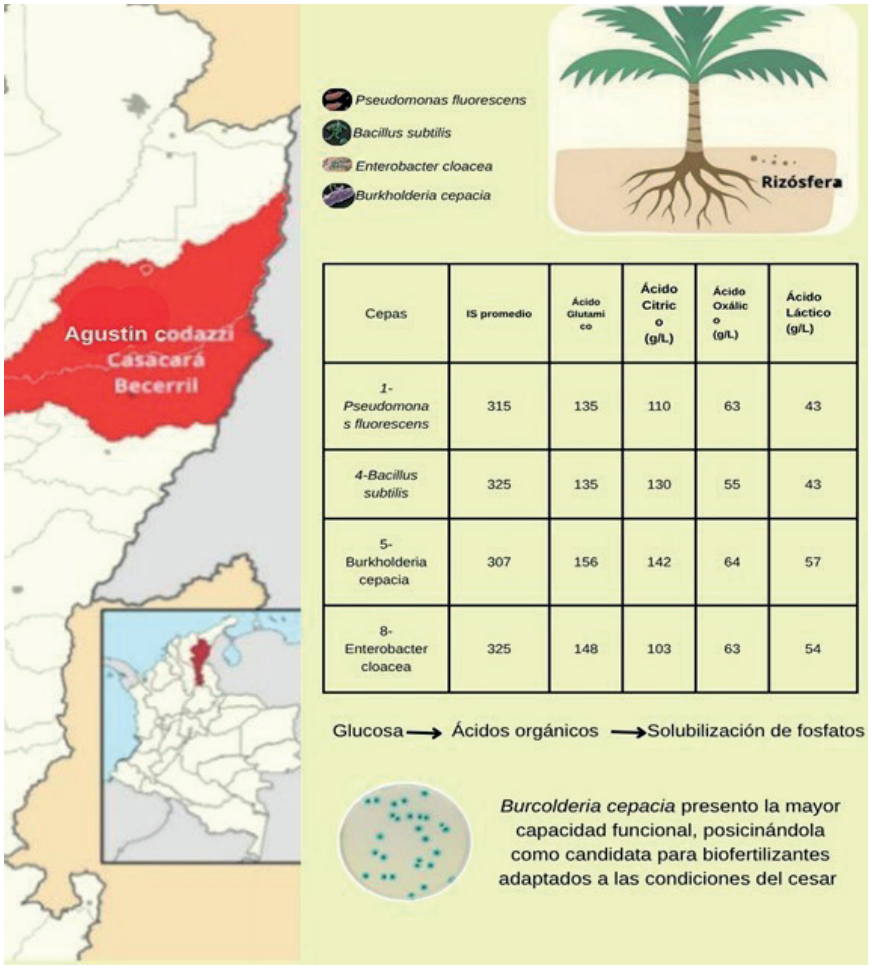
Knowledge gap: In the department of Cesar, where this crop has high economic relevance, there is little information on the diversity and functional potential of BSF present in the rhizosphere, which restricts the development of biofertilizers adapted to local conditions.

Objective: To isolate, identify and characterize phosphate-solubilizing bacteria in soils cultivated with African palm in Cesar, evaluating their capacity to produce organic acids. Methodology: Thirty rhizospheric soil samples were collected from five commercial plantations. Bacteria were isolated on selective medium with insoluble phosphate and their solubilization rate was evaluated. Identification was performed by amplification of the 16S rRNA gene and the organic acid profile was determined by high performance liquid chromatography.

Results and conclusions: Nine strains with high solubilizing capacity were isolated, identifying Pseudomonas fluorescens, Bacillus subtilis, Enterobacter cloacae and Burkholderia cepacia, the latter not previously reported in Cesar. The strains produced gluconic, citric and oxalic acid, showing their potential for the development of regional biofertilizers.

Keywords: Organic acids; Microbial biodiversity; Liquid chromatography; Soil microbiology; African palm; Rhizosphere

RESUMEN GRÁFICO



Cepas	IS promedio	Ácido Glutamico	Ácido Citrico (g/L)	Ácido Oxálico (g/L)	Ácido Láctico (g/L)
1-Pseudomonas fluorescens	315	135	110	63	43
4-Bacillus subtilis	325	135	130	55	43
5-Burkholderia cepacia	307	156	142	64	57
8-Enterobacter cloacea	325	148	103	63	54

1 INTRODUCCIÓN

El fósforo (P) es uno de los macronutrientes más importantes para el desarrollo de las plantas (García et al., 2020), desempeñando funciones importantes en procesos bioquímicos como la fotosíntesis (Rodríguez & Fraga, 1999), la transferencia de energía y la biosíntesis de ácidos nucleicos (Sharma et al., 2013). A pesar de su abundante presencia en los suelos, el fósforo suele encontrarse en formas insolubles no disponibles para las plantas, lo que limita su absorción y eficiencia agronómica (Khan et al., 2007), obligando al uso intensivo de fertilizantes químicos fosfatados que, aunque resulten ser eficaces en el corto plazo, pueden generar impactos negativos en el ambiente, como la eutrofización de cuerpos de agua y la alteración de la microbiota del suelo (Glick, 2012).

Ante las limitaciones que impiden el acceso de las plantas al fósforo presente en

los suelos, debido a su forma insoluble, las bacterias solubilizadoras de fosfato (BSF) se presentan como una alternativa biológica y eficaz, debido a su potencial metabólico de transformar los compuestos fosfatados insolubles en formas solubles, mediante la secreción de ácidos orgánicos, enzimas y otras sustancias (Rashid et al., 2004a), lo cual facilita la absorción del fósforo por las raíces (Moreno-Conn et al., 2021) y mejora la nutrición vegetal de manera sostenible. Estas bacterias representan una alternativa prometedora a los fertilizantes químicos, ya que promueven el crecimiento vegetal y reducen el impacto ambiental asociado al uso excesivo de insumos sintéticos (Glick, 2012).

Además de facilitar la disponibilidad de fósforo, las bacterias solubilizadoras de fosfato contribuyen a mejorar la estructura y fertilidad del suelo al estimular la actividad microbiana y aumentar la biodiversidad rizosférica (Vassilev et al., 2006). Estas bacterias han sido ampliamente estudiadas por su capacidad de promover el crecimiento vegetal mediante múltiples mecanismos, como la producción de fitohormonas, la fijación biológica de nitrógeno, la síntesis de sideróforos y la inducción de resistencia sistémica en las plantas (Rodríguez & Fraga, 1999). En sistemas agrícolas sostenibles, su uso como biofertilizantes representa una estrategia eficiente y ecológica para disminuir la dependencia de fertilizantes químicos, reducir costos de producción y mejorar el rendimiento de los cultivos (Khan et al., 2009).

En materia metabólica, las BSF destacan por su habilidad de secretar diversos ácidos orgánicos, como ácido glucónico, cítrico, oxálico y láctico (Oliveira et al., 2017), los cuales, liberan el fósforo inmovilizado en minerales como fosfato de calcio, hierro o aluminio (Illmer & Schinner, 1995). Este proceso de solubilización es altamente eficiente y varía entre especies y condiciones del suelo, lo que resalta la importancia de caracterizar las cepas locales para su aplicación específica (Zúñiga-Silgado et al., 2020). Además, la interacción sinérgica entre diferentes géneros bacterianos, como *Pseudomonas, Bacillus, Burkholderia* y *Enterobacter*, potencia la efectividad de los consorcios microbianos en programas de biofertilización (Sharma et al., 2013).

En Colombia, la palma africana (*Elaeis guineensis*) es un cultivo de gran importancia económica, especialmente en regiones como el departamento del Cesar. Sin embargo, la degradación del suelo reduce la materia orgánica y altera su estructura, disminuyendo la retención y liberación de nutrientes esenciales como el fósforo; aunque el fósforo total puede ser relativamente alto, la fracción disponible para absorción por las plantas suele ser menor al 1 %, lo que limita procesos clave de crecimiento y desarrollo, afectando directamente la productividad de la palma africana (Jindo et al., 2023).

Algunos estudios han caracterizado comunidades microbianas rizosféricas con potencial de solubilización de fosfato. Por ejemplo, Acevedo, E. et al. (2014) identificaron microorganismos solubilizadores de fosfato en la rizósfera de palma africana en Colombia, incluyendo bacterias y hongos con alta eficiencia de solubilización, y observaron liberación de ácidos orgánicos asociados a la

solubilización de P. Asimismo, estudios en Malasia aislaron bacterias solubilizadoras de fosfato de la rizósfera de palma africana relacionadas con especies de *Burkholderia*, destacando su potencial como biofertilizantes (por ejemplo, *B. arboris* y *B. gladioli*) (Smith et al., 2020). En cultivos distintos, como maíz y trigo, la inoculación con BSF ha demostrado mejorar la disponibilidad de fósforo en el suelo y promover el crecimiento vegetal, lo que respalda la relevancia agronómica de estos microorganismos a nivel global (De Oliveira et al., 2025; Beltran-Medina et al., 2023). A pesar del potencial de las BSF, pocos estudios han caracterizado la diversidad microbiana rizosférica asociada a este cultivo en el Cesar. El presente estudio tuvo como objetivo aislar e identificar bacterias solubilizadoras de fosfato en suelos cultivados con palma africana en el departamento del Cesar, utilizando herramientas moleculares y cromatográficas para analizar su capacidad funcional.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

Tipo y enfoque de investigación

Esta investigación es de tipo experimental con enfoque cuantitativo, dado que se planteó un diseño basado en la recolección y análisis sistemático de datos numéricos, tanto en laboratorio como en campo. Se utilizaron técnicas microbiológicas, moleculares y cromatográficas para el aislamiento, identificación y caracterización funcional de cepas bacterianas solubilizadoras de fosfato. El enfoque cuantitativo permitió establecer relaciones entre variables microbiológicas y agronómicas, generando resultados objetivos, medibles y reproducibles que pueden ser comparados con investigaciones similares a nivel nacional e internacional.

Muestreo

Se recolectaron 30 muestras compuestas de suelo rizosférico en cinco plantaciones comerciales de palma africana en los municipios de Becerril, Agustín Codazzi y Casacará, todos en el departamento del Cesar (Colombia). El muestreo se realizó siguiendo un diseño sistemático en zig-zag, de acuerdo con las recomendaciones del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, 2021), lo que permitió obtener una representación de la variabilidad del suelo. En cada sitio de muestreo y siguiendo lo sugerido por Borbón Valverde (2023), se tomaron las muestras entre 0 y 20 cm de profundidad. Las muestras fueron transportadas en condiciones refrigeradas (4 °C) al laboratorio para su análisis inmediato, siguiendo el protocolo de Vassilev et al. (2006).

Procesamiento de muestras

Las muestras fueron homogeneizadas y tamizadas (2 mm). Se tomaron 10 g de suelo de cada muestra, se diluyeron en 90 mL de agua destilada estéril y, luego, se agitaron durante 30 minutos y se realizaron diluciones seriadas

hasta 10^{-6}, siguiendo las recomendaciones de Cappuccino & Sherman (2013).

Aislamiento de cepas

Las diluciones se sembraron por dispersión en placas de agar Pikovskaya (PVK), suplementado con fosfato de calcio insoluble ($Ca_3(PO_4)_2$) (Pikovskaya, 1948). Las placas se incubaron a 28 °C durante siete días. Pasado el tiempo, se seleccionaron las colonias que formaron halos claros de solubilización y se calcularon los índices de solubilización (IS) mediante la relación diámetro del halo/diámetro de la colonia, ello, acatando lo sugerido por Nautiyal (1999). Se seleccionaron las cepas que presentaron índice de solubilidad entre 3,0 y 3,4.

Identificación de cepas mediante PCR

Para la identificación de las cepas, se extrajo el ADN genómico mediante el método de lisis térmica. La amplificación del gen 16S rRNA se realizó utilizando los cebadores universales 27F (5'-AGAGTTTGATCMTGGCTCAG-3') y 1492R (5'-TACGGYTACCTTGTTACGACTT-3') (Lane, 1991). Las secuencias obtenidas se compararon con la base de datos NCBI mediante BLAST para identificar las especies de bacterias aisladas.

HPLC para análisis de perfil de ácidos orgánicos secretados

Las cepas seleccionadas en el paso anterior e identificadas por PCR, se cultivaron en medio líquido PVK modificado durante cinco días. El sobrenadante del cultivo fue filtrado y analizado mediante cromatografía líquida de alta resolución (HPLC) con detector UV a 210 nm, usando una columna C18 y una fase móvil de ácido fosfórico al 0,1 % a 1 mL/min con el fin de cuantificar los ácidos orgánicos de acuerdo con la metodología de Park et al. (2009).

Análisis estadístico

Los datos obtenidos, como el índice de solubilización (IS) y de la concentración de ácidos orgánicos secretados por las cepas bacterianas fueron sometidos a un análisis de varianza (ANOVA) de una vía, con el objetivo de determinar si existían diferencias estadísticamente significativas entre cada una de las cepas. Posteriormente, se aplicó la prueba de comparación múltiple de Tukey ($p < 0,05$) para identificar qué cepas presentaban diferencias significativas entre sí. El análisis fue realizado utilizando el *software* estadístico IBM SPSS Statistics versión 26.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El aislamiento en medio Pikovskaya permitió aislar nueve cepas con halos de solubilización, con índices de solubilización entre 2,66 y 3,25 (Tabla 1). Estas cepas presentaron morfologías coloniales variadas, con bordes regulares y pigmentaciones

blanquecinas o cremosas, lo que sugiere una diversidad fenotípica entre los aislados. La formación de halos claros alrededor de las colonias indicó la capacidad de solubilización de fosfato, lo cual, de acuerdo con Marra et al. (2015), es atribuible a la producción de ácidos orgánicos que disuelven el fosfato de calcio presente en el medio.

Tabla 1.

Índice de solubilización de cepas aisladas

Cepa	Repetición	DC (mm)	DH (mm)	IS (mm)	X IS	DS IS
1	a	5,6	16,7	2,98	3,15	0,15
	b	5,3	17	3,21		
	c	5,2	17	3,27		
2	a	6	18	3,00	2,96	0,10
	b	6,1	17,4	2,85		
	c	6	18,2	3,03		
3	a	4,7	12	2,55	2,80	0,25
	b	4,3	13,1	3,05		
	c	4,8	13,4	2,79		
4	a	5,6	17,4	3,11	3,25	0,13
	b	5,4	18,2	3,37		
	c	5,5	18	3,27		
5	a	5,4	16	2,96	3,07	0,11
	b	4,9	15,6	3,18		
	c	5,1	15,6	3,06		
6	a	6	16,5	2,75	2,70	0,05
	b	6,1	16,4	2,69		
	c	6,2	16,5	2,66		

Cepa	Repetición	DC (mm)	DH (mm)	IS (mm)	X IS	DS IS
7	a	5,1	13,9	2,73	2,86	0,12
	b	5	14,8	2,96		
	c	5	14,5	2,90		
8	a	4,9	16	3,27	3,25	0,04
	b	4,9	15,7	3,20		
	c	4,9	16,1	3,29		
9	a	5,3	14,2	2,68	2,66	0,02
	b	5,5	14,5	2,64		
	c	5,3	14,2	2,68		

DC: Diámetro colonia; DH: Diámetro del halo; IS: Índice de solubilidad.

Fuente: autores.

De acuerdo con Veas Mattheos (2022), las cepas que presentan mayor solubilidad de fosfato mediado por la producción de ácidos orgánicos son aquellas que expresan halos entre 3,0 y 3,4, por tanto, y de acuerdo con la tabla anterior, las cepas que presentaron mayor IS fueron la cepa 1 (3,15 mm), cepa 4 (3,25 mm), cepa 5 (3,07 mm) y la cepa 8 (3,25 mm).

El uso del medio de cultivo Pikovskaya (PVK) en este estudio permitió aislar nueve cepas con índices de solubilización (IS) entre 2,66 y 3,25 mm, lo que indica una alta eficiencia en la solubilización de fosfato. Estos resultados son comparables con los obtenidos por Yañez-Ocampo (2020), quien reportó halos de solubilización de hasta 20 mm en cepas de *Bacillus pumilus* aisladas de suelos de cultivo de papa. La diferencia en el tamaño absoluto de los halos puede atribuirse a variaciones en las condiciones a las que son sometidos los experimentos, como el tiempo de incubación, la concentración de fosfato insoluble, el pH del medio y la tasa de crecimiento bacteriano, así como a diferencias metabólicas intrínsecas entre especies y cepas; además, Yañez-Ocampo (2020) reporta diámetros de halo, mientras que en el presente estudio se emplea el índice de solubilización (IS), que normaliza el tamaño del halo respecto al diámetro de la colonia, permitiendo comparaciones más consistentes entre las cepas. Asimismo, Panhwar et al. (2012a) reportaron índices de solubilización entre 1,20 y 3,60 en bacterias solubilizadoras de fosfato aisladas de suelos de arroz, utilizando medio PVK, valores que se encuentran dentro del rango observado en el presente estudio, destacando su utilidad

en la detección de cepas con alta capacidad solubilizadora. Estos hallazgos respaldan la efectividad del medio PVK como herramienta estándar para la selección de BSF en diversos contextos agrícolas.

La identificación molecular reveló la presencia de *Pseudomonas fluorescens* (cepa 1), *B. subtilis* (cepa 4) y *Enterobacter cloacae* (cepa 8), todas previamente reportadas en suelos agrícolas del Cesar (García et al., 2020); además de, *B. cepacia* (cepa 5) que no había sido reportada previamente en este departamento, lo cual constituye un hallazgo novedoso. Esta especie ha mostrado gran capacidad para solubilizar fósforo y promover el crecimiento vegetal en otros contextos agrícolas, como cultivos de arroz, maíz y trigo, donde se ha asociado con incrementos en la disponibilidad de fósforo y el crecimiento radicular de las plantas (Mitra et al., 2020).

La identificación molecular de las cepas aisladas en esta investigación se realizó mediante la amplificación del gen 16S rRNA, permitiendo la clasificación taxonómica precisa de las bacterias. Este enfoque es consistente con el utilizado por Hazra & Pratiwi (2013), quienes emplearon la secuenciación del 16S rRNA para identificar cepas de Gluconacetobacter y Enterobacter con capacidades solubilizadoras de fosfato. De manera similar, Sridevi & Mallaiah (2009) aislaron y caracterizaron bacterias solubilizadoras de fosfato asociadas a la rizósfera de palma aceitera (*E. guineensis*), identificando mediante secuenciación del gen 16S rRNA especies pertenecientes a los géneros *Pseudomonas*, *Bacillus* y *Enterobacter*, los cuales coinciden con los géneros identificados en el presente estudio. Asimismo, Panhwar et al. (2014) emplearon análisis del gen 16S rRNA para establecer relaciones filogenéticas entre bacterias solubilizadoras de fosfato aisladas de suelos cultivados con palma aceitera en Malasia, reportando una alta diversidad taxonómica dominada por *Bacillus* y *Burkholderia*, lo que respalda la recurrencia de estos géneros en sistemas de palma. Estos estudios demuestran que la secuenciación del gen 16S rRNA es una herramienta confiable para la identificación y clasificación de BSF.

Con la finalidad de cuantificar la cantidad de ácidos orgánicos que secretan cada una de las cepas identificadas, se realizó la técnica de HPLC, la cual reveló que las cepas secretan principalmente ácido glucónico, seguido de ácido cítrico, oxálico y láctico, todos ellos relacionados con la solubilización de fosfato por disolución de compuestos minerales insolubles (Illmer & Schinner, 1995).

La figura 1 muestra las concentraciones (g/L) de cuatro ácidos orgánicos clave (glucónico, cítrico, oxálico y láctico), en cuanto al ácido glucónico, *B. cepacia* presentó la mayor producción (1,56 g/L), superando a las demás cepas, lo que indica una alta capacidad de oxidación de glucosa mediada por glucosa deshidrogenasa, fundamental en la solubilización de fosfato cálcico (Marra et al., 2015). *E. cloacae* (1,48 g/L) también mostró un buen desempeño, seguida de *P. fluorescens* y *B. subtilis*, ambas con 1,35 g/L.

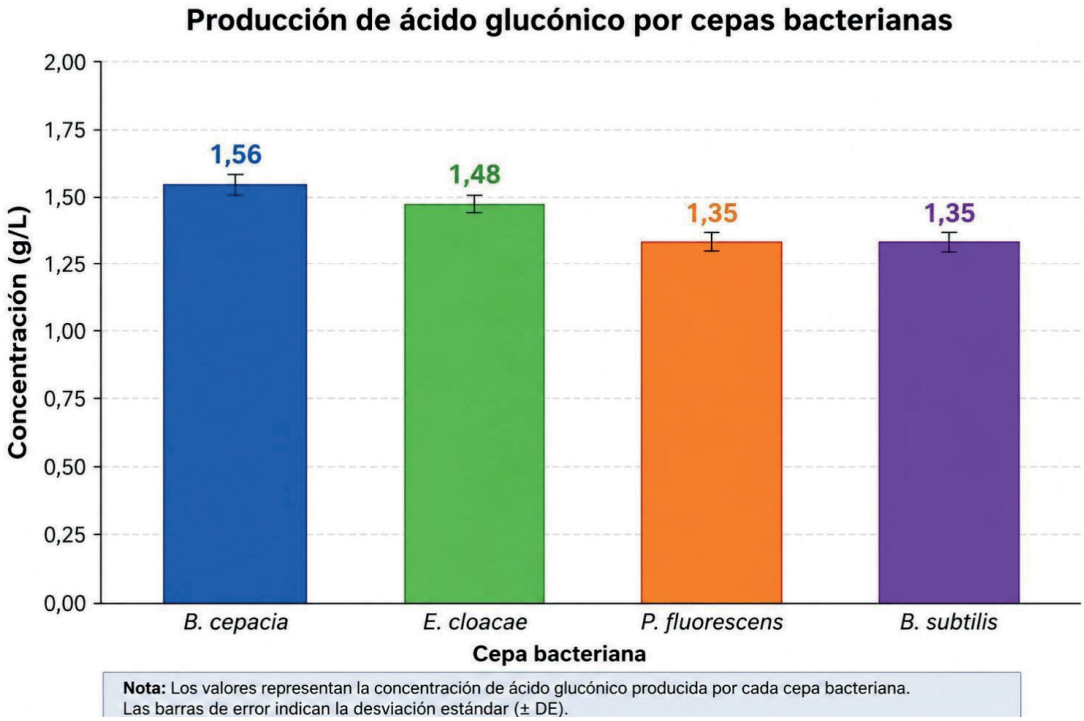


Figura 1. Producción de ácidos orgánicos a partir de bacterias solubilizadoras de fosfato. (Letras diferentes entre tipos de ácidos orgánicos indican diferencia significativa de acuerdo con el test de Tukey).

Fuente: autores.

La producción de ácido cítrico relacionado en la figura 1, en donde nuevamente *B. cepacia* lidera con 1,42 g/L, seguida de *B. subtilis* (1,30 g/L). La capacidad de estas cepas para liberar ácido cítrico sugiere una implicación del metabolismo del ciclo de Krebs desviado hacia rutas de excreción, útil en la quelación de cationes como Ca^{2+}, Fe^{3+} o Al^{3+} (Aguilar Rivera, 2020), que inmovilizan el fósforo. *P. fluorescens* (1,10 g/L) y *E. cloacae* (1,03 g/L) mostraron niveles más bajos, lo que podría traducirse en una menor capacidad quelante.

En el caso del ácido oxálico, la producción fue relativamente homogénea entre *B. cepacia*, *P. fluorescens* y *E. cloacae* con concentraciones de 0,64 g/L, 0,63 g/L y 0,63 g/L, respectivamente; mientras que *B. subtilis* mostró una menor producción (0,55 g/L). Al respecto, Ramos Cabrera et al. (2021), publicaron que este ácido es relevante en la movilización de fosfatos por su alta capacidad para formar complejos con metales.

El ácido láctico se expresó en menor concentración en todas las cuatro cepas, si se compara con los demás ácidos; en este caso, *B. cepacia* (0,57 g/L) también lidera la producción, seguida de *E. cloacae* (0,54 g/L). Los niveles más bajos se observaron en *P. fluorescens* y *B. subtilis* (0,43 g/L). Moreno-Conn et al. (2021) sugieren que el ácido

láctico puede contribuir a la solubilización por reducción del pH en la rizósfera, aunque su rol es menos significativo que el de otros ácidos más fuertemente complejantes.

La cepa *B. cepacia* se destaca como la más eficiente en la producción total de ácidos orgánicos, lo que sugiere un metabolismo robusto y diversificado para la solubilización de compuestos fosfatados (Veas Mattheos, 2022). Esta característica le confiere un alto potencial como biofertilizante. Le siguen *E. cloacae* y *B. subtilis*, que también muestran perfiles interesantes, aunque con menor capacidad para la producción de ácidos con función quelante directa. *P. fluorescens*, si bien tiene valores intermedios, podría considerarse en futuros estudios de consorcios microbianos, dada su capacidad para solubilizar fosfato y adaptarse a las condiciones del experimento.

Este estudio reveló que las cepas aisladas secretan principalmente ácido glucónico, seguido de ácido cítrico y oxálico, todos ellos relacionados con la solubilización de fosfato. Estos resultados coinciden con los de Kaur et al. (2021), quienes encontraron que el ácido glucónico es el principal ácido orgánico producido por cepas de BSF en presencia de diferentes fuentes de fosfato insoluble. Además, estudios previos con bacterias solubilizadoras de fosfato aisladas de suelos de arroz y maíz reportaron la producción significativa de ácido glucónico, cítrico y oxálico mediante HPLC, resaltando la consistencia de estos metabolitos como mecanismos comunes en BSF (Panhwar et al., 2012b; Rashid et al., 2004b). Estos hallazgos corroboran que la producción de ácidos orgánicos es un mecanismo clave en la solubilización de fosfato por parte de BSF.

Finalmente, los resultados de este estudio amplían el conocimiento sobre la microbiota rizosférica de palma africana en el Cesar, evidenciando la presencia de géneros dominantes como *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Enterobacter* y *Burkholderia*. Estos hallazgos son consistentes con estudios previos realizados en Colombia y Malasia, donde se reporta que la rizósfera de *Elaeis guineensis* alberga bacterias solubilizadoras de fosfato de los mismos géneros, asociadas a la disponibilidad de fósforo y la promoción del crecimiento vegetal (Sridevi & Mallaiah, 2009; Panhwar et al., 2014; Nugraha et al., 2019; Roslan et al., 2025). En particular, la identificación de *B. cepacia* en el Cesar constituye un hallazgo novedoso, reforzando la importancia de caracterizar cepas locales con potencial biotecnológico para el desarrollo de biofertilizantes adaptados a condiciones agroecológicas regionales. Además, la producción de ácidos orgánicos (glucónico, cítrico, oxálico y láctico) por estas cepas coincide con los perfiles reportados en otros estudios, confirmando que la secreción de metabolitos quelantes es un mecanismo clave en la solubilización de fosfatos minerales.

4 CONCLUSIONES

La investigación evidencia el potencial biotecnológico de las bacterias solubilizadoras de fosfato aisladas en suelos cultivados con palma africana en el departamento del Cesar. Se identificaron cepas de los géneros *Pseudomonas, Bacillus, Enterobacter* y *Burkholderia*, las cuales demostraron la capacidad para transformar fosfatos insolubles en formas disponibles para las plantas, principalmente mediante la producción de ácidos orgánicos como el glucónico, cítrico, oxálico y láctico. Esta actividad metabólica representa una alternativa ecológica frente al uso intensivo de fertilizantes químicos y un recurso estratégico para mejorar la eficiencia en la nutrición fosfatada, especialmente en agroecosistemas tropicales.

Entre las cepas aisladas, *B. cepacia* destacó por su mayor índice de solubilización (3,25) y alta producción de ácidos orgánicos, posicionándose como una candidata ideal para el desarrollo de biofertilizantes adaptados a las condiciones locales. Su aislamiento en el Cesar constituye un hallazgo novedoso que fortalece el conocimiento sobre el microbiota rizosférica de la palma africana, un cultivo de alta relevancia económica. Además, la identificación molecular y funcional de estas cepas representa un avance clave para la generación de bioinsumos que promuevan una agricultura más sostenible, resiliente y alineada con los objetivos de conservación ambiental.

CONTRIBUCIÓN DE LA AUTORÍA

Autor 1: revisión bibliográfica, diseño metodológico, muestreo de suelo, aislamiento bacteriano en medio Pikovskaya, evaluación del IS, ejecución de pruebas de laboratorio y análisis de resultados.

Autor 2: búsqueda y análisis de literatura científica, apoyo en la fase experimental (identificación molecular por PCR y análisis cromatográfico HPLC), organización y tabulación de datos, interpretación de resultados, redacción del manuscrito.

Autor 3: asesoría científica y metodológica, acompañamiento en el diseño experimental, supervisión de la ejecución en laboratorio.

Autor 4: supervisión académica y logística.

AGRADECIMIENTOS

A la Asociación de Palmicultores del Cesar por su apoyo en la recolección de muestras y por facilitar el acceso a las plantaciones, lo cual fue fundamental para el desarrollo de esta investigación.

FINANCIAMIENTO

No aplica.

USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

No aplica.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

LITERATURA CITADA

Acevedo, E., Galindo-Castañeda, T., Prada, F., Navia, M., Romero, H. M. (2014). Phosphate-solubilizing microorganisms associated with the rhizosphere of oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) in Colombia. *Applied Soil Ecology*, *80*, 26-33.

Aguilar Rivera, K. A. (2020). Aislamiento de bacterias solubilizadoras de fosfato del suelo cultivado con papa (*Solanum tuberosum* L.). [Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de México]. Repositorio Institucional UAEMex. http://hdl.handle.net/20.500.11799/109176

Beltran-Medina, I., Romero-Perdomo, F., Molano-Chavez, L., Gutiérrez, A. Y., Silva, A. M. M., & Estrada-Bonilla, G. (2023). Inoculation of phosphate-solubilizing bacteria improves soil phosphorus mobilization and maize productivity. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, *126*, 21-34.

Borbón Valverde, L. F. (2023). Evaluación de *Pseudomonas fluorescens*, *Bacillus subtilis* y *Streptomyces sp.*, como potenciales microorganismos solubilizadores de fósforo (P) en un suelo Andisol. [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional, Costa Rica]. Repositorio UNA. https://repositorio.una.ac.cr/items/12c61fb3-bfd0-4e48-b99b-42abde6bbb89

Cappuccino, J. G., & Sherman, N. (2013). Microbiology: A Laboratory Manual (10th ed.). Pearson.

De Oliveira, R. G., Lana, U. G. d. P., de Oliveira-Paiva, C. A., Campolino, M. L., de Avelar, J. V. S. A., Gomes, E. A., Santos, T. T., dos Santos, F. C., & Tinôco, S. M. d. S. (2025). Phosphate-solubilizing bacteria and phosphorus fertilization shape microbial dynamics in the maize rhizosphere. *Diversity*, *17*(10), 711.

Elhaissoufi, W., Ghoulam, C., Barakat, A., Zeroual, Y., & Bargaz, A. (2022). Phosphate bacterial solubilization: *A key rhizosphere driving force enabling higher P use efficiency and crop productivity. Journal of Advanced Research*, 38, 13-28. https://doi.org/10.1016/j.jare.2021.08.014

Fankem, H., Nwaga, D., Deubel, A., Dieng, L., Merbach, W., & Etoa, F. X. (2006). Occurrence and functioning of phosphate solubilizing microorganisms from oil palm tree (Elaeis guineensis) rhizosphere in Cameroon. African Journal of Biotechnology, 5(24), 2450-2460.

García, L., Ramírez, M. y Padilla, D. (2020). Diversidad microbiana rizosférica en suelos del departamento del Cesar. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 22(1), 45-54.

Glick, B. R. (2012). Plant growth-promoting bacteria: mechanisms and applications. Scientifica, 2012, 1-15. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.6064/2012/963401

Hazra, F., & Pratiwi, E. (2013). Isolation, Characterization, and Molecular Identification of Phosphate Solubilizing Bacteria from Several Tropical Soils. *Journal of Tropical Soils*, *18*(1), 67-74. https://www.researchgate.net/publication/271128649_Isolation_Characterization_and_Molecular_Identification_of_Phosphate_Solubilizing_Bacteria_from_Several_Tropical_Soils

Illmer, P., & Schinner, F. (1995). Solubilization of inorganic calcium phosphates — Solubilization mechanisms. *Soil Biology and Biochemistry*, *27*(3), 257-263. https://doi.org/10.1016/0038-0717(94)00190-U

Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC]. (2021). *Descripción y muestreo de suelos* (Código INGAGPC0505). Subdirección de Agrología. https://www.igac.gov.co/sites/default/files/listadomaestro/ingag-pc05-05_descripcion_y_muestreo_de_suelos.pdf

Irawan, A. F., Baskara, G., Wandri, R., & Asmono, D. (2020). Isolation and solubilisation of inorganic phosphate by Burkholderia spp. from the rhizosphere of oil palm. Pakistan Journal of Biological Sciences, 23(5), 667-673. https://doi.org/10.3923/pjbs.2020.667.673

Jindo, K., Audette, Y., Lopez Olivares, F., Canellas, L. P., Smith, D. S., & Voroney, R. P. (2023). Biotic and abiotic effects of soil organic matter on the phytoavailable phosphorus in soils: A review. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, *10*(29), 1-20. https://doi.org/10.1186/s40538-023-00401-y

Kaur, C., Selvakumar, G., & Upreti, K. K. (2021). Organic Acid Profiles of Phosphate Solubilizing Bacterial Strains in the Presence of Different Insoluble Phosphatic Sources Under In vitro Buffered Conditions. Journal of Pure and Applied Microbiology, *15*(2), 1006-1015. https://doi.org/10.22207/JPAM.15.2.59Microbiology Journal+1Microbiology Journal+1

Khan, M. S., Zaidi, A., & Wani, P. A. (2007). The role of phosphate-solubilizing microorganisms in sustainable agriculture.

Agronomy for Sustainable Development, *27*(1), 29-43.

Khan, M. S., Zaidi, A., Ahemad, M., Oves, M., & Wani, P. A. (2009). Plant growth promotion by phosphate solubilizing fungi – Current perspective. *Archives of Agronomy and Soil Science*, *55*(2), 125-145. https://doi.org/DOI:10.1080/03650340902806469

Lane, D. J. (1991). 16S/23S rRNA sequencing. In Stackebrandt, E., & Goodfellow, M. (Eds.), *Nucleic Acid Techniques in Bacterial Systematics,* 115-175. John Wiley & Sons.

Marra, L. M., Oliveira-Longatti, S. M., Soares, C. R. F. S., Lima, J. M., Olivares, F. L., & Moreira, F. M. S. (2015). Initial pH of medium affects organic acids production but do not affect phosphate solubilization. *Brazilian Journal of Microbiology, 46*(2), 367-375. https://doi.org/10.1590/S1517-838246246220131102

Moreno-Conn, L. M., López-Casallas, M. y Cruz Barrera, F. M. (2021). Solubilización de fosfatos por bacterias del género Burkholderia aisladas de oxisoles de la altillanura colombiana. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria, 22(*2), e1897. https://doi.org/10.21930/rcta.vol22_num2_art:1897

Nautiyal, C. S. (1999). An efficient microbiological growth medium for screening phosphate solubilizing microorganisms. *FEMS Microbiology Letters*, *170*(1), 265-270.

Oliveira, C. A., Alves, V. M. C., Marriel, I. E., Gomes, E. A., Scotti, M. R., Carneiro, N. P., Guimarães, C. T., & Schaffert, R. E. (2017). Phosphate solubilizing microorganisms: their role in crop production. *Biotechnology Advances, 35*(1), 54-62. https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2016.10.003

Panhwar, Q. A., Othman, R., Rahman, Z. A., Meon, S., & Ismail, M. R. (2012). Iso-lation and characterization of phospha-te-solubilizing bacteria from aerobic rice. *African Journal of Biotechnology. 11*(11), 2711-2719. https://www.ajol.info/index.php/ajb/article/view/100662AJOL DOI: 10.5897/AJB10.2218

Panhwar(a), Q. A., Radziah, O., Zaharah, A. R., Sariah, M., & Mohd Razi, I. (2014). Isolation and characterization of phosphate-solubilizing bacteria from aerobic rice and oil palm soils. *African Journal of Microbiology Research*, *8*(3), 179-187.

Panhwar(b), Q. A., Radziah, O., Zaharah, A. R., Sariah, M., & Mohd Razi, I. (2012). Isolation and characterization of phosphate-solubilizing bacteria from aerobic rice and oil palm soils. *African Journal of Microbiology Research*, *8*(3), 179-187.

Park, J. H., Bolan, N., Megharaj, M., & Naidu, R. (2009). Comparative value of phosphate sources on the growth and nutrient uptake of a legume–rhizobium symbiotic system. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, *172*(5), 613-620.

Pikovskaya, R. I. (1948). Mobilization of phosphorus in soil in connection with vital activity of some microbial species. *Microbiologiya*, *17*, 362-370. https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1514468

Ramos Cabrera, E. V., Delgado Espinosa, Z. Y., Murillo Muñoz, R. A., Muños Días, V. E. y Hoyos García, J. (2021). Evaluación de bacterias endofíticas solubilizadores de fósforo en café, una alternativa sostenible. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, *19*(2), 1-10. https://doi.org/10.18684/bsaa.v19.n2.2021.1554

Rashid, M., Charles, T. C., & Glick, B. R. (2004a). Isolation and characterization of new plant growth-promoting bacterial strains from canola and other crops. *Soil Biology and Biochemistry*, *36*(9), 1507-1516.

Rashid, M., Khalil, S., Ayub, N., Alam, S., & Latif, F. (2004b). Organic acids production and phosphate solubilization by phosphate solubilizing microorganisms (PSM) under in vitro conditions. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, *7*(2), 187-196. https://doi.org/10.3923/pjbs.2004.187.196

Rodríguez, H., & Fraga, R. (1999). Phosphate solubilizing bacteria and their role in plant growth promotion. *Biotechnology Advances*, *17*(4-5), 319-339. https://doi.org/10.1016/S0734-9750(99)00014-2

Roslan, H., Omar, R., & Sariah, M. (2025). Peng, S. H. T., Chee, K. H., Saud, H. M., Yusop, M. R., & Tan, G. H. (2023). Potential Novel Plant Growth Promoting Rhizobacteria for Bio-Organic Fertilizer Production in the Oil Palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) in Malaysia. *Applied Sciences,* 13(12), 7105. https://doi.org/10.3390/app13127105

Sharma, S. B., Sayyed, R. Z., Trivedi, M. H., & Gobi, T. A. (2013). Phosphate solubilizing microbes: sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils. *SpringerPlus*, *2*(1), 587. https://doi.org/10.1186/2193-1801-2-587

Sridevi, M., & Mallaiah, K. V. (2009). Phosphate solubilizing bacteria from the rhi-zosphere of oil palm *(Elaeis guineensis Jacq.). Journal of Plantation Crops,* 37(2), 158-163. DOI: 10.1007/s12088-009-0005-1

Vassilev, N., Vassileva, M., & Nikolaeva, I. (2006). Simultaneous P-solubilizing and biocontrol activity of microorganisms: potentials and future trends. *Applied Microbiology and Biotechnology*, *71*(2), 137-144. https://doi.org/10.1007/s00253-006-0380-z

Veas Mattheos, K. (2022). Bacterias solubilizadoras de fosfato asociadas a cianolíquenes Peltigera rufescens creciendo en praderas del sur de Chile. [Tesis de licenciatura, Universidad de Chile]. Repositorio UChile. https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/196114

Yañez-Ocampo, G. (2020). Isolated Phosphate-Solubilizing Soil Bacteria Promotes In vitro Growth of Solanum tuberosum L. *Polish Journal of Microbiology*, *69*(3), 357-365. https://doi.org/10.33073/pjm-2020-039PubMed+2Sciendo+2Sciendo+2 DOI: 10.33073/pjm-2020-039

Zúñiga-Silgado, D., Rivera-Leyva, J. C., Coleman, J. J., Sánchez-Reyez, A., Valencia-Díaz, S., Serrano, M., deBashan, L.

E., & Folch-Mallol, J. L. (2020). Soil type affects organic acid production and phosphorus solubilization efficiency mediated by several native fungal strains from Mexico. *Microorganisms*, *8*(9), 1337. https://doi.org/10.3390/microorganisms8091337

Conflicto de intereses
Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Licencia de Creative Commons
Revista de Investigación Agraria y Ambiental is licensed under a Creative Commons Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual 4.0 Internacional License.

Fecha de recibido: 02-09-2025
Fecha de aceptado: 06-02-2026
DOI: 10.22490/21456453.10346

PRESENCIA DE PRODUCTOS FARMACÉUTICOS EN AGUA: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA PARA COLOMBIA

PRESENCE OF PHARMACEUTICAL PRODUCTS IN WATER: A SYSTEMATIC REVIEW FOR COLOMBIA

Andrés J. Bonilla-Reyes[1]

Jonny A. Yepes-Blandón[2]

Miguel A. Navarro-Ramírez[3]

Citación: Bonilla-Reyes, A. J., Yepes-Blandón, J. A. y Navarro-Ramírez, M. A. (2026). Presencia de productos farmacéuticos en agua: una revisión sistemática para Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental, 17*(2), 247-283.
https://doi.org/10.22490/21456453.10346

[1] Estudiante de Maestría en Biología de la Universidad de Antioquia. Grupo de Investigación en Química de los Recursos Naturales - QUIMERA. Universidad de los Llanos. Villavicencio, Colombia, y Grupo de Investigación en Organismos Acuáticos Nativos y Exóticos - GIOANE. Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia. andresjulian.bonilla@udea.edu.co
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6218-2925

[2] Doctor en Biología. Grupo de Investigación en Organismos Acuáticos Nativos y Exóticos - GIOANE. Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia. jonny.yepes@udea.edu.co
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6276-5488

[3] Doctor en Química. Grupo de Investigación en Química de los Recursos Naturales QUIMERA. Universidad de los Llanos. Villavicencio, Colombia. miguel.navarro@unillanos.edu.co
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5535-4784

RESUMEN

Contextualización: En las últimas décadas, el creciente uso y la inadecuada disposición de pesticidas, herbicidas, productos farmacéuticos y de cuidado personal (PPCPs) han generado preocupación por sus efectos negativos en los ecosistemas acuáticos y en la salud humana.

Vacío del conocimiento: Estos compuestos, que ya han sido detectados en diversos cuerpos de agua en Colombia, incluyen medicamentos de uso humano y veterinario, drogas ilícitas, cosméticos y productos de higiene personal. Sin embargo, no se tiene un panorama nacional sobre su distribución y prevalencia.

Propósito: El objetivo fue evaluar el estado actual del conocimiento sobre la presencia de PPCPs en matrices acuáticas de Colombia.

Metodología: Se realizó una revisión sistemática PRISMA de investigaciones publicadas entre 2012 y 2024, sobre la presencia de PPCPs en muestras de agua en el territorio colombiano a través de diferentes motores de búsqueda, usando operadores booleanos.

Resultados y conclusiones: Se identificaron 116 compuestos diferentes, de los cuales los antibióticos (17,9 %), analgésicos y antinflamatorios (11,1 %) son los dos grupos más reportados. En particular, la carbamazepina (5,2 %), el diclofenaco (4,9 %) y el ibuprofeno (4,6 %) fueron los compuestos más estudiados. Los tipos de muestra más analizados corresponden a aguas superficiales (26,1 %) y aguas residuales tratadas (23,9 %). Los hallazgos destacan la amplia distribución de estos contaminantes en diferentes matrices acuáticas y subrayan la urgencia de establecer normativas específicas para su monitoreo y control. Esta revisión proporciona una base científica para la gestión del riesgo ambiental asociado a los PPCPs y para la formulación de políticas públicas orientadas a la protección de la calidad del agua en Colombia.

Palabras clave: contaminantes emergentes, residuos farmacéuticos, contaminación acuática, aguas residuales, riesgo ecológico.

ABSTRACT

Contextualization: In recent decades, the increasing use and improper disposal of pesticides, herbicides, pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) have raised concerns about their negative effects on aquatic ecosystems and human health.

Knowledge gap: These compounds, which have already been detected in various bodies of water in Colombia, include human and veterinary drugs, illicit drugs, cosmetics and personal hygiene products. However, there is no national overview of its distribution and prevalence.

Objective: To evaluate the current state of knowledge on the presence of PPCPs in aquatic matrices in Colombia.

Methodology: A PRISMA systematic review of research published between 2012 and 2024 on the presence of PPCPs in water samples in the Colombian territory was carried out through different search engines using Boolean operators.

Results and conclusions: A total of 116 different compounds were identified, of which antibiotics (17.9%); analgesics and anti-inflammatory drugs (11.1%) were the two most reported groups. In particular, carbamazepine (5.2%), diclofenac (4.9%) and ibuprofen (4.6%) were the most studied compounds. The most analyzed sample types correspond to surface water (26.1%) and treated wastewater (23.9%). The findings highlight the wide distribution of these contaminants in different aquatic matrices and underscore the urgency of establishing specific regulations for their monitoring and control. This review provides a scientific basis for the management of environmental risk associated with PPCPs and for the formulation of public policies aimed at protecting water quality in Colombia.

Keywords: Emerging contaminants, pharmaceutical residues, aquatic contamination, wastewater, ecological risk.

RESUMEN GRÁFICO



Fuente: autores, creado con apoyo de Canva.

1 INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, la creciente amenaza a los ecosistemas y a la salud humana ha sido impulsada no solo, por el aumento en el uso de productos como pesticidas, herbicidas y en especial productos farmacéuticos y de cuidado personal (PPCPs, por sus iniciales en inglés), sino también y en mayor medida por su inadecuada disposición final (Lamb et al., 2024). Estos contaminantes emergentes (CE) incluyen grandes grupos como: medicamentos tanto humanos, como veterinarios, drogas ilegales, productos de cuidado personal y cosméticos (PPCPs), los cuales ya han sido detectados en diferentes ecosistemas acuáticos, como aguas superficiales (AS) (Gracia-Lor et al., 2012), sistemas de riego (SR) (Aleán-Flórez et al., 2021), plantas de tratamiento de

aguas residuales (PTAR) (Jiménez-Bambague et al., 2023a; Serna-Galvis et al., 2019b), residuos hospitalarios (RH) (Serna-Galvis et al., 2019a, 2022a) y plantas de tratamiento de aguas potables (PTAP) (Aristizabal-Ciro et al., 2017), entre otros. A partir de la pandemia del COVID-19, se destaca el aumento de algunos analgésicos y antinflamatorios en matrices como agua, especialmente en las PTAR (Jiménez-Bambague et al., 2023a).

La creciente detección y acumulación de productos farmacéuticos y de cuidado personal (PPCPs) en ecosistemas acuáticos ha despertado un interés significativo por comprender su origen, distribución y efectos (Das & Raj, 2025). Si bien existen numerosos estudios que documentan la presencia de estos compuestos en agua y peces (Dasenaki & Thomaidis, 2015; da Silva et al., 2025; Morin-Crini et al., 2022; Peña-Guzmán et al., 2019), persiste una notable brecha de conocimiento respecto a sus efectos tóxicos, especialmente a nivel molecular, celular y fisiológico.

Aunque se ha avanzado en el desarrollo de métodos analíticos para la identificación de PPCPs en compartimentos ambientales y en diferentes organismos, por su parte, los estudios enfocados en sus mecanismos de acción son aún limitados (aus der Beek et al., 2016). En este contexto, la presente revisión tuvo como objetivo evaluar el estado actual del conocimiento sobre la presencia de PPCPs en matrices acuáticas de Colombia, así como resaltar la necesidad de promover estudios toxicológicos más integrales. Esto permitiría fortalecer las estrategias de monitoreo ambiental, generar evidencia técnica para el diseño de políticas públicas de regulación y mejorar la comprensión de los impactos ecológicos de estos contaminantes emergentes en los ecosistemas acuáticos.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

Criterios de inclusión

La presente revisión incluyó únicamente artículos de investigación en los idiomas inglés, portugués y español. En estos se priorizaron aquellos sobre la presencia y cuantificación de PPCPs en muestras ambientales dulceacuícolas de Colombia, usando literatura indexada internacional y especializada. Además, se enfocó en los ecosistemas acuáticos como aguas superficiales (AS) (ríos, lagos, lagunas), agua de escorrentía (AE), aguas residuales (AR) (domésticas, industriales y hospitalarias, ARH-, agua potable (AP), sistemas de riego (SR) y efluentes y afluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales (E/A PTAR-) y potables (E/A PTAP).

Criterios de exclusión

Por otra parte, artículos como revisiones, informes, tesis y resúmenes de congresos, así como estudios relacionados con contaminantes diferentes a productos farmacéuticos y de cuidado personal (PPCPs), (p. ej., metales, pesticidas, herbicidas, hidrocarburos y cianotoxinas) no fueron considerados.

Búsqueda y selección de estudios

La búsqueda de literatura se realizó en enero de 2025, tomando como fecha inicial de compilación de información el año 2012 (primer artículo en el que reportó PPCPs para Colombia) hasta diciembre de 2024. Se emplearon las bases de datos Scopus, ScienceDirect, SpringerLink, Taylor & Francis por poseer una gran cobertura de revistas en categorías de química ambiental, contaminación, contaminantes emergentes y ecotoxicología, usando las palabras clave: "Pharmaceuticals", "Emerging contaminants", "Contamination", "Water", "PPCPs" y "Colombia". Por su parte, se utilizaron operadores booleanos para limitar los resultados obtenidos ("AND" y "OR"). La búsqueda se enfocó en el título, resumen y palabras claves. Los artículos se revisaron y evaluaron de manera manual e independiente para determinar su elegibilidad para el respectivo análisis. Todas las etapas del proceso de selección de artículos se documentaron en un diagrama de flujo, siguiendo las directrices de los Elementos de Informe Preferidos para Revisiones Sistemáticas y Metaanálisis (PRISMA) (Moher et al., 2009; Page et al., 2021).

Limitaciones metodológicas

La presente revisión sistemática ofrece un panorama basado en evidencia arbitrada, no obstante, se reconoce un sesgo inherente asociado a la exclusión de literatura gris y repositorios institucionales. Es probable que existan datos preliminares, en tesis de pregrado o posgrados no indexadas, sobre regiones poco estudiadas, como la Orinoquía o la Amazonía. Sin embargo, la decisión de excluir estas fuentes obedeció a la falta de estandarización analítica y a la dificultad de verificar la calidad de los datos. Por otro lado, algunos estudios no reportan las fechas de muestreo, por tanto, el presente trabajo constituye el primer paso para la construcción de una línea base de la presencia de PPCPs en Colombia. Asimismo, los vacíos de la información en gran parte del territorio nacional no deben interpretarse como ausencia de riesgo, sino como una evidencia de la necesidad urgente de fortalecer los monitoreos en todas las regiones.

Recopilación de datos

La información de cada estudio (n=23) fue extraída y organizada de manera manual en el *software* Microsoft Excel (Microsoft Corporation, 2025). Mediante esta herramienta se procesaron los datos descriptivos y se generaron las representaciones gráficas correspondientes, considerando las siguientes variables: departamento estudiado, tipo de contaminante (estudiado y detectado), tipo de matriz hídrica, concentraciones reportadas, método analítico, año de realización del estudio y bibliografía.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de la revisión bibliográfica y los criterios de exclusión se detallan en la figura 1. La búsqueda inicial tuvo un total 237 artículos, de los cuales 223 fueron obtenidos en las bases de datos y 14 a través de fuentes complementarias (bibliografía o recomendaciones). Se identificaron 31 artículos duplicados que fueron eliminados, quedando en total 206 estudios. Posterior a una revisión de títulos y resúmenes, quedaron 150 artículos, de los cuales se excluyeron 54 por no cumplir los criterios de inclusión para esta revisión. Los 96 artículos seleccionados fueron analizados detalladamente y, en consecuencia, se seleccionaron 23 artículos que cumplían con los criterios establecidos en este trabajo. La caracterización de los artículos analizados se encuentra disponible en la información suplementaria, donde se detalla la información descrita anteriormente en la recopilación de los datos (ver tabla S1). Asimismo, en la tabla S2 se consolidan los 116 compuestos detectados y su respectiva clasificación por grupo terapéutico.

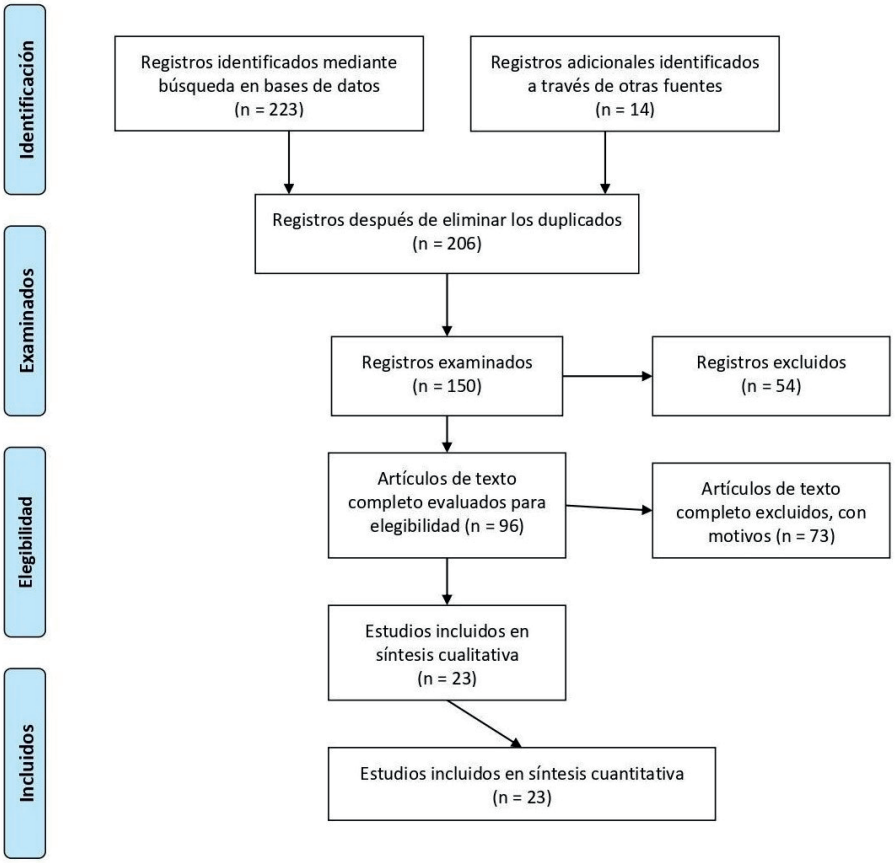


Figura 1. Diagrama de flujo de la búsqueda y selección de artículos en el proceso de la revisión sistemática

Fuente: autores.

Para esta revisión (hasta 2024), en Colombia se han estudiado 116 compuestos, clasificados en: antibióticos, analgésicos y antinflamatorios, reguladores de lípidos en sangre, antihipertensivos, drogas ilícitas, neurológicos, antiepilépticos, medios de contraste, hormonas, filtros UV de protectores solares, antiparasitarios, fenoles, fármacos metabólicos y metabolitos, conservantes, productos médicos, endulzantes, fragancias, agentes antimicrobianos y β-bloqueadores, donde los antibióticos, analgésicos y antinflamatorios son los grupos más estudiados (17,9 % y 11,1 %, respectivamente) (Figura 2.). De manera puntual, la carbamazepina (neurológico), diclofenaco e ibuprofeno (analgésicos y antinflamatorios) son los compuestos más estudiados (5,2 %, 4,9 % y 4,6 %, respectivamente) (Figura 3.). Así mismo, los tipos de agua más analizados son AS y E-PTAR (26,0 % y 24,0 %, respectivamente), le siguen otras matrices relacionadas a las PTAR e incluso a AP y PTAP (Figura 4.).

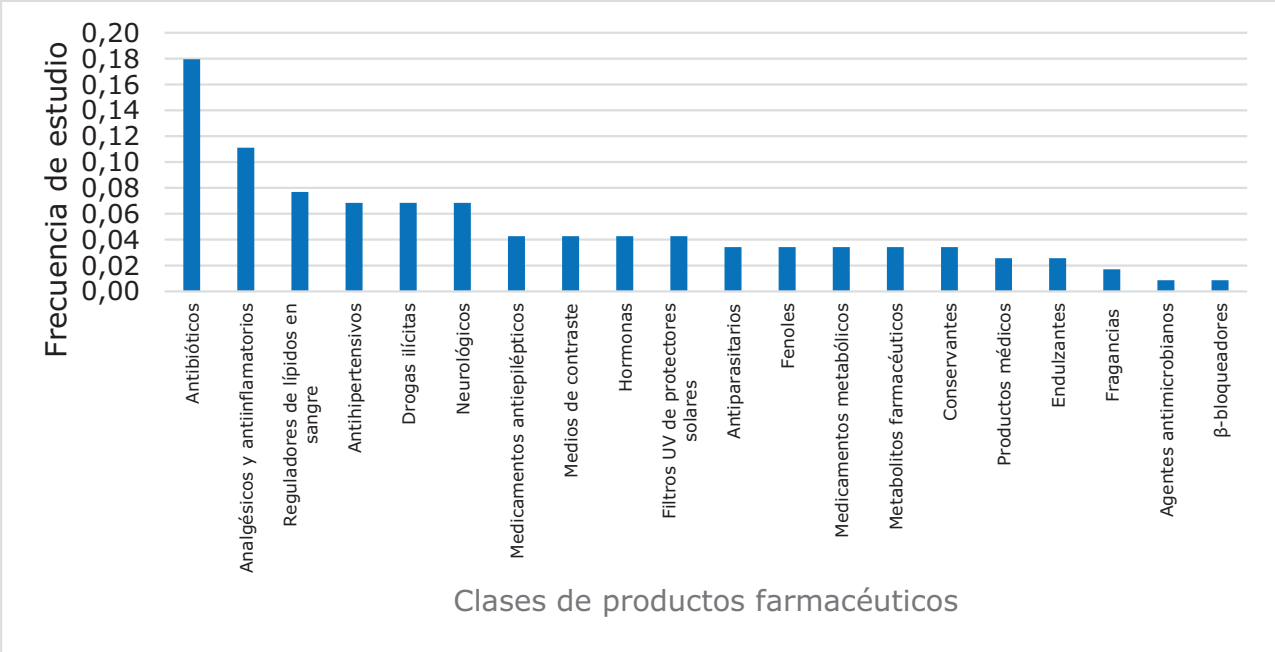


Figura 2. Frecuencia de mayor a menor estudio, agrupados por clases de productos farmacéuticos en el agua de Colombia

Fuente: autores.

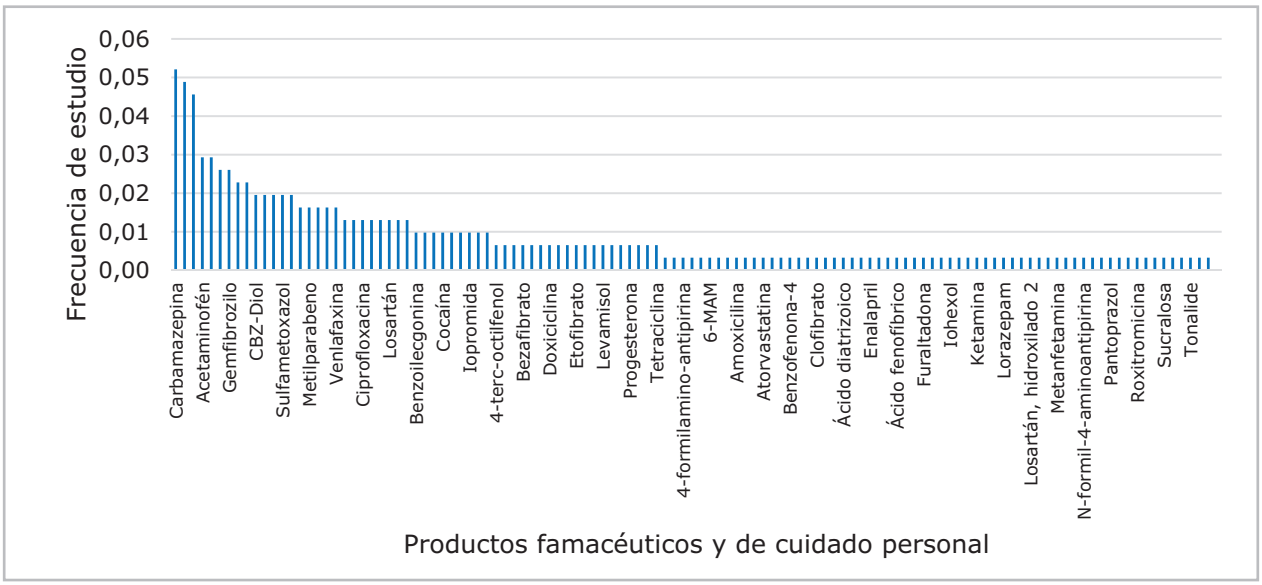


Figura 3. Frecuencia de mayor a menor de los 116 PPCPs estudiados en el agua de Colombia

Fuente: autores.

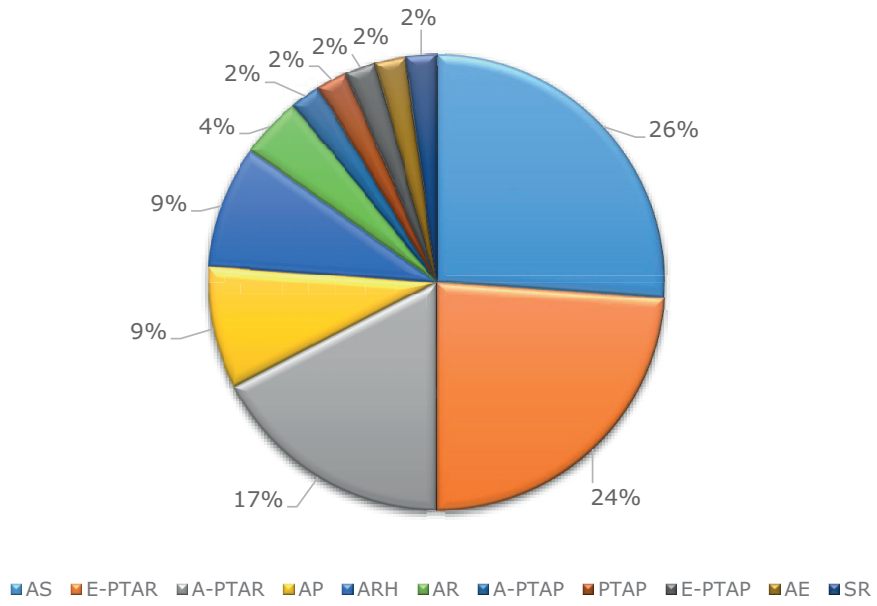


Figura 4. Tipos de agua analizados para la detección de PPCPs en Colombia. AS: aguas superficiales, E-PTAR: efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales, A-PTAR: afluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales, AP: aguas potables, ARH: aguas residuales hospitalarias, AR: aguas residuales, PTAP: planta de tratamiento de aguas potables, A-PTAP: afluente de planta de tratamiento de aguas potables, E-PTAP: efluente de planta de tratamiento de aguas potables, AE: agua de escorrentía, SR: sistemas de riego

Fuente: autores.

Fuentes de distribución de los PPCPs

La contaminación por PPCPs en los ecosistemas acuáticos se origina principalmente por rutas como la lixiviación y las plantas de tratamiento de aguas residuales e industriales (Daughton & Ternes, 1999; Lamb et al., 2024), las cuales, a través del sistema de alcantarillado, recogen los diferentes vertimientos de los hogares.

Colombia, con 1103 municipios (DANE, 2025a), tiene 624 (57 %) municipios sin ningún sistema de tratamiento de aguas residuales (Bustos-Murillo et al., 2023). Por su parte, solo 9 de los 32 departamentos (Antioquia, Valle del Cauca, Cundinamarca, Córdoba, Nariño, Santander, Risaralda, Cauca y Caquetá) tienen algún tipo de estudio sobre la presencia de productos farmacéuticos en la matriz agua, de los cuales Antioquia, con un total de 9 estudios de los 32 reportados, es el departamento con el mayor número de estudios en el país (Figura 5). Cabe resaltar que las zonas con mayor frecuencia de estudio se centran en la región Andina, coincidiendo con la mayor densidad poblacional de viviendas (DANE, 2025b) y con procesos de la industria manufacturera del país (Fuentes-López et al., 2019). Estos estudios se han centrado sobre la cordillera Occidental y Central, especialmente en las principales ciudades (Bijlsma et al., 2016) y en la cuenca Magdalena-Cauca (Cerón & Peñuela, 2024. Asimismo, se ha evidenciado que, debido a las características de funcionamiento de las PTAR, no son apropiadas para depurar PPCPs, siendo así ineficientes para su remoción (Arrubla et al., 2016; Jiménez-Bambague et al., 2020a), lo que genera un riesgo que afecta la calidad de los ecosistemas acuáticos. Por su parte, sobre la cordillera Oriental, especialmente en la región de la Orinoquia hasta el momento no se cuenta con estudios sobre CE.

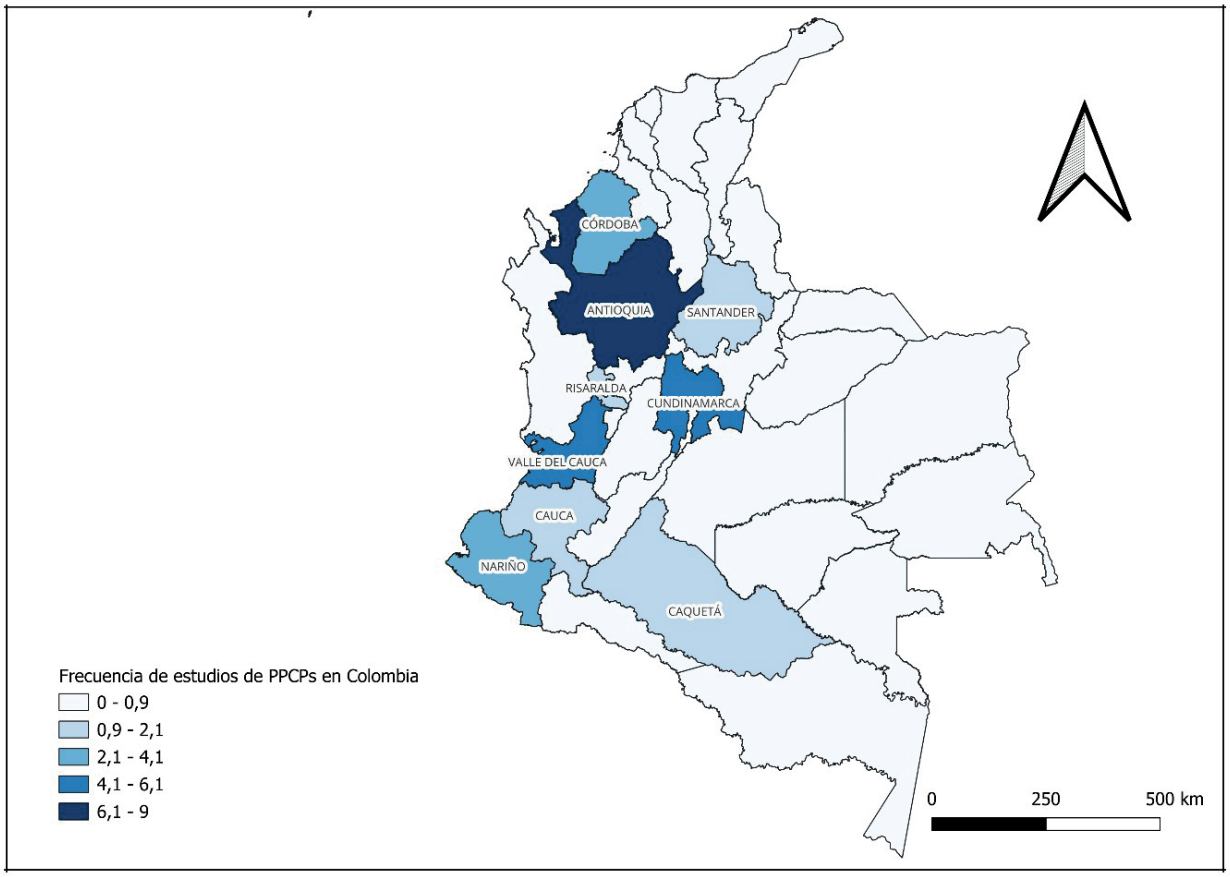


Figura 5. Distribución de la frecuencia de estudios de PPCPs en los departamentos de Colombia. El azul más oscuro hace referencia a los departamentos que más presentan estudios

Fuente: autores.

Antibióticos

Dentro del grupo de los antibióticos de uso humano y veterinario, se han estudiado 21 compuestos, de los cuales se destacan amoxicilina, dicloxacilina, cefalexina y ciprofloxacina como los antibióticos con el mayor volumen de ventas y, por lo tanto, de consumo para el tratamiento de infecciones bacterianas (Serna-Galvis et al., 2022b). Sin embargo, dada su alta resistencia, poca degradación de manera natural y la ineficiencia de las PTAR para su adecuada remoción, la trimetoprima es el antibiótico más analizado. La trimetoprima fue inicialmente detectada en 2015 (Hernández et al., 2015) y posteriormente cuantificada en AP, RW, AR, ARI, ARH y AS con una concentración entre 0,21 y 21,84 µg/L (Bedoya-Ríos et al., 2018; Botero-Coy et al., 2018; Madera-Parra et al., 2018; Serna-Galvis et al., 2019a, 2019b, 2022a). A su vez, antibióticos como claritromicina, sulfametoxazol y clindamicina, debido a su alta efectividad contra diferentes bacterias y bajo índice de efectos negativos en humanos, promueve a un aumento no regulado en su consumo. Lo anterior, sumado a la ineficiencia de las PTAR, conduce a

que diferentes comunidades bacterianas que se encuentren expuestas constantemente a presiones selectivas antibióticas generen un acelerado desarrollo de resistencia a los antibióticos en humanos y animales, lo que fomenta la transferencia de genes de resistencia (Larsson & Flach, 2022; Martínez, 2009).

Analgésicos y antinflamatorios

Dentro de esta categoría, en Colombia, se han estudiado mayormente 13 compuestos. De los cuales, el diclofenaco es el más detectado y cuantificado en los diferentes tipos de agua. Varios estudios reportan su presencia de manera constante (Arrubla et al., 2016; Gracia-Lor et al., 2012; Jiménez-Bambague et al., 2023), con concentraciones entre 0,12 y 92,1 µg/L (Botero-Coy et al., 2018; Gallego-Ríos & Peñuela, 2021; Hernández et al., 2015; Jiménez-Bambague et al., 2020a, 2020b, 2023a; Madera-Parra et al., 2018; Pemberthy et al., 2020; Serna-Galvis et al., 2019a, 2019b, 2022). Le siguen en este orden, ibuprofeno, acetaminofén, naproxeno y ketoprofeno, confirmándose como los analgésicos más prescritos y usados en las ciudades (Solano y Garavito, 2013; Valladales-Restrepo et al., 2022).

Otros productos farmacéuticos

En esta categoría, la carbamazepina es el compuesto más analizado y detectado (Figura 2.), con concentraciones entre 0,012 y 36,92 µg/L, siendo el río Bogotá (Madera-Parra et al., 2018) la matriz analizada con la mayor concentración, le sigue un distrito de riego en el departamento de Córdoba con una concentración de 23,46 µg/L (Aleán-Flórez et al., 2021). Este fármaco, que tiene un uso antiepiléptico y neurológico, se ha descrito como un indicador de la presencia de aguas residuales al ser un compuesto antropogénico y recalcitrante (Wolf et al., 2012).

Efectos de productos farmacéuticos en peces

Dada la preocupación por la presencia de estos contaminantes en las aguas superficiales y su "efecto cóctel" en las mezclas complejas (Cleuvers, 2004; Pawłowska, 2025), se ha impulsado el estudio de la bioacumulación de estos productos y cómo los peces están respondiendo a estas mezclas complejas. En un contexto global, en los peces Dorada (*Sparus aurata*) y Lubina (*Perciformes*) se han detectado más de 100 PPCPs en tejido muscular (Dasenaki & Thomaidis, 2015); además, en otras especies, como el Barbo del Ebro (*Luciobarbus graellsii*), Carpa común (*Cyprinus carpio*), Anguila europea (*Anguilla anguilla*) y Múgil (*Liza ramada*), se han detectado un total de 30 compuestos, no solo en su tejido muscular sino también en sus diferentes órganos (Manjarrés-López et al., 2023). En Colombia, en el tejido muscular del bagre rayado del Magdalena (*Pseudoplatystoma magdaleniatum*), una especie importante en la pesquería y la seguridad alimentaria para las cuencas del Magdalena-Cauca, Atrato y Sinú, se han detectado metilparabeno (32 µg/kg), carbamazepina (44,48-90,80 µg/Kg) (Cacua-Ortiz et al., 2020), diclofenaco (6,20-8,80 µg/Kg) (Gallego-Ríos & Peñuela, 2021) y triclosán (20,21-54,67 µg/Kg) (Zapata & Peñuela, 2021). Esto plantea preocupaciones tanto ecológicas como en la seguridad

alimentaria, porque la presencia de estos compuestos en el tejido muscular de *P. magdaleniatum* sugiere una persistencia sistémica y la posibilidad de biomagnificación a través de la red trófica. Esto implica considerar futuras evaluaciones de riesgos en las diferentes comunidades que hagan consumo de este pescado o con aguas que presenten estos contaminantes.

En estudios recientes sobre los efectos de algunos PPCPs en la expresión génica en peces, se ha evidenciado que el triclocarbán (antimicrobiano), a concentraciones entre 5 y 50 µg/L. induce una sobreexpresión del gen C-FOS y subexpresión del gen BDNF en el cerebro de larvas del pez cebra (*Danio rerio*). La afectación a ambos genes, asociados al funcionamiento sináptico y la activación neuronal, sugiere alteraciones en la plasticidad y el desarrollo cerebral (Lucon-Xiccato et al., 2023). En individuos posjuveniles de *Clarias gariepinus* se ha estudiado el impacto toxicogenómico del ibuprofeno y el ftalato de dibutilo, encontrando alteraciones en la expresión génica de la hormona de crecimiento (GH), interleucina-1 beta (IL-1 β), receptores de melatonina (MEL1C), 17b-hidroxiesteroide deshidrogenasa (HSD17B2), proteína de choque (HSP70), el factor de transcripción de *doublesex* y mab-3 (DMRT1), con una sobreexpresión de proteína *forkhead* L2 (FOXL2) y del citocromo p450 (CYP11A1) (Ogunwole et al., 2024).

Por otro lado, algunos antibióticos, como ciprofloxacina, trimetoprima y sulfadiazina, han demostrado modular la transcripción de genes del eje hipotálamo-hipofisario-tiroideo-interrenal, específicamente la hormona liberadora de tirotropina (TRH) y la proteína transportadora de la hormona liberadora de corticotropina (CRHBP, por sus iniciales en inglés). Asimismo, en *Sparus aurata,* se reportaron alteraciones en marcadores de estrés oxidativo, como catalasa (CAT), glutatión reductasa (GR) y peroxidación lipídica (LPO) (Fernández et al., 2022). De manera complementaria, la exposición aguda y crónica al antibiótico eritromicina en la misma especie *S. aurata* mostró una reducción de los niveles de glutatión peroxidasa (GPx) en el hígado, con un aumento en las branquias, así como una elevación en la actividad de glutatión reductasa (GRd) hepática y una disminución de sustancias reactivas al ácido tiobarbitúrico (TBARS, por sus iniciales en inglés), todos ellos indicadores de estrés oxidativo (Rodrigues et al., 2019). Finalmente, también en *S. aurata* como modelo de especie íctica marina, se ha evaluado el efecto combinado de una mezcla de carbamazepina, cloruro de cadmio y éter difenílico polibromado, evidenciando alteraciones en la expresión génica de IL1-β, IL-6, IL-8 en el hígado e intestino, los cuales están implicados en la regulación de procesos de inmunidad y antinflamatorios (Espinosa-Ruiz et al., 2021).

Debido a que todo el ecosistema y en especial los humanos estamos expuestos a los PPCPs, por múltiples vías, como el consumo de agua, el contacto con aguas de uso recreacional y la ingesta de productos con bioacumulación de estos compuestos, es de vital importancia determinar la presencia de PPCPs y su concentración en los ecosistemas acuáticos, así como estimar los efectos biológicos que pueden inducir, como los genotóxicos (Jacquin et al., 2020; Picinini-

Zambelli et al., 2025). Lo anterior es fundamental para la creación de políticas públicas que estén orientadas a mitigar sus impactos negativos en la biodiversidad y en la salud pública (Souza et al., 2022).

Normatividad en Colombia

Para Colombia, Caviedes-Rubio et al. (2017) presentaron una revisión sobre la normativa ambiental, dirigida a la regulación de la presencia de productos farmacéuticos en ecosistemas acuáticos, evidenciando el desarrollo de políticas públicas específicas para la gestión de estos contaminantes. Hasta la fecha, el país se enfoca en la gestión integral de los residuos sólidos con la Resolución 2184 (MADS, 2019), residuos peligrosos (RESPEL) con el Decreto 1076 (MADS, 2015a) y en la devolución de medicamentos vencidos posconsumo, según la Resolución 0371 (MAVDT, 2009), con el fin de mitigar la contaminación por la disposición inadecuada de estas sustancias. Sin embargo, estas medidas están orientadas hacia la prevención y el control dentro del ciclo comercial y productivo, sin una regulación específica que aborde la contaminación de los PPCPs en el agua. La ausencia de normatividad específica en este tema resalta la necesidad de fomentar diversas estrategias de monitoreo, control y mitigación de estas sustancias. Asimismo, existen las Corporaciones Autónomas Regionales (CAR) por jurisdicción según la Ley 99, Art. 31 (CRC, 1993), que son las encargadas de aplicar las normativas ambientales en cada región. Entre sus actos administrativos se encuentran licencias de vertimientos, campañas de disposición de residuos, manejo de redes de alcantarillado y la adecuación de plantas de tratamientos de aguas residuales. A diferencia del contexto colombiano, donde la regulación se limita a parámetros fisicoquímicos básicos, según la Resolución 0631 (MADS, 2015b), organismos internacionales han avanzado hacia la priorización de contaminantes específicos. La Unión Europea, a través de la Directiva Marco del Agua, estableció una "Lista de Observación" que obliga al monitoreo de sustancias emergentes, como diclofenaco, ibuprofeno, macrólidos (eritromicina, claritromicina, azitromicina) y, más recientemente, carbamazepina, algunos de ellos en sustancias prioritarias (European Commission, 2022a, 2022b); curiosamente, estos coinciden con los compuestos más frecuentemente detectados en los cuerpos de agua de Colombia, según esta revisión. Asimismo, la EPA en Estados Unidos utiliza la "Lista de Contaminantes Candidatos (CCL, por sus iniciales en inglés)" para identificar contaminantes no regulados en el agua potable que requieren investigación prioritaria (US EPA, 2022). La ausencia de una lista similar en Colombia impide la gestión eficaz del riesgo sanitario y ambiental.

Limitaciones de esta revisión

A pesar de los avances metodológicos para detectar contaminantes emergentes (CE) en cuerpos de agua y organismos acuáticos, la mayoría de los estudios se han enfocado en aguas superficiales y en plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR). En estas últimas, los trabajos se han dirigido a la búsqueda de tecnologías o estrategias para mitigar la presencia de dichos compuestos (Li et al., 2024; Osuoha et al., 2023). No obstante,

en el contexto colombiano, los estudios que evalúan la bioacumulación o los efectos de los CE en peces son escasos. Esta limitación impide establecer lineamientos regulatorios con un enfoque nacional, restringiendo las decisiones principalmente al ámbito local o regional. Por otro lado, se reconoce una limitación metodológica al excluir literatura gris y otras bases de datos, por lo que podría subestimar la cantidad de estudios utilizados en la presente revisión. Sin embargo, con esta revisión se plantea un primer escenario nacional, aportando a un consolidado de la presencia de PPCPs en Colombia.

Recomendaciones para futuras investigaciones

Esta revisión destaca la importancia de profundizar en investigaciones orientadas a evaluar los efectos de las mezclas complejas de productos farmacéuticos y de cuidado personal (PPCPs), especialmente a concentraciones ambientalmente relevantes. En el contexto colombiano, se recomienda ampliar la cobertura geográfica y la variedad de ecosistemas estudiados, con el propósito de construir un diagnóstico nacional más representativo. Además, es fundamental abordar las posibles interacciones sinérgicas o antagónicas entre estos compuestos, así como sus efectos acumulativos a lo largo de la cadena trófica. Asimismo, se sugiere explorar los mecanismos moleculares que subyacen a las respuestas biológicas observadas, integrando enfoques de biología molecular y tecnologías ómicas que permitan comprender con mayor profundidad las consecuencias ecológicas de estos contaminantes.

4 CONCLUSIONES

La presente revisión sistemática presenta un diagnóstico nacional sobre PPCPs en Colombia, donde se identificaron 116 compuestos farmacéuticos distribuidos en diversas matrices hídricas, con una predominancia de antibióticos y analgésicos/antinflamatorios. Específicamente, la carbamazepina, el diclofenaco y el ibuprofeno se perfilan como los marcadores de contaminación antropogénica más ubicuos en el país.

Respecto a la frecuencia nacional de los estudios se revela una asimetría, donde las investigaciones se concentran en la región Andina, liderada por el departamento de Antioquia, lo cual se asocia con la mayor densidad demográfica e industrial del territorio. En contraste, la ausencia de reportes indexados en regiones como la Orinoquía no debe interpretarse como ausencia de riesgo, sino como un vacío en la infraestructura de monitoreo que requiere atención inmediata para establecer líneas base en los diferentes ecosistemas.

Asimismo, la detección frecuente de estos compuestos en efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales (E-PTAR) evidencia la insuficiencia de las tecnologías convencionales implementadas en el país para la remoción de estos contaminantes. Esta persistencia genera un escenario de exposición

crónica y de mezclas complejas en las aguas superficiales receptoras, implicando riesgos ecotoxicológicos subletales, como genotoxicidad y disrupción endocrina, para la ictiofauna nativa y un riesgo para la salud pública.

En consecuencia, los hallazgos aquí sintetizados trascienden el diagnóstico y subrayan la urgencia de crear/actualizar la normativa colombiana para la gestión ambiental. Además, es imperativo transitar del monitoreo fisicoquímico básico hacia la regulación específica de contaminantes emergentes y la modernización de los sistemas de tratamiento, garantizando así la seguridad hídrica y la integridad ecológica de los recursos neotropicales.

CONTRIBUCIÓN DE LA AUTORÍA

Autor 1: conceptualización, metodología, investigación, análisis de datos, redacción, borrador original, revisión y edición.

Autor 2: investigación, conceptualización, análisis de datos, redacción, revisión y edición, supervisión.

Autor 3: investigación, conceptualización, análisis de datos, redacción, revisión y edición, logística, supervisión, administración del proyecto, adquisición del recurso.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a los profesores José Ariel Rodríguez Pulido y Luz Yaneth Orozco Jiménez por los comentarios y sugerencias en este manuscrito.

FINANCIAMIENTO

Este artículo forma parte del proyecto "C10-F02-004-2024" financiado por la Universidad de los Llanos, a través de la Convocatoria para el Fortalecimiento de las Capacidades Científicas, Tecnológicas y de Innovación Articuladas con la Agenda Institucional de Investigaciones: Área de Investigación en Biodiversidad, Medioambiente y Desarrollo Sustentable 2024.

USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

No aplica.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de interés de tipo financiero, profesional o personal, que hayan afectado de manera directa o indirecta al desarrollo de la presente revisión.

LITERATURA CITADA

Alean, J. A., Méndez, D. M., Núñez, S. M. B., Enamorado-Montes, G., & Negrete, J. M. (2021). Productos farmacéuticos y de cuidado personal presentes en aguas superficiales, de consumo humano y residuales en el departamento de Córdoba, Colombia [Material suplementario]. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, *12*(2). https://doi.org/10.22490/21456453.4231

Aleán-Flórez, J. D., Márquez Méndez, D. S., Burgos Núñez, S. M., Enamorado-Montes, G. H. y Marrugo Negrete, J. L. (2021). Presencia de contaminantes emergentes (CE) en los distritos de riego del departamento de Córdoba, Colombia. *Orinoquia*, *25*(1), 57-63. https://doi.org/10.22579/20112629.686

Aristizabal-Ciro, C., Botero-Coy, A. M., López, F. J., & Peñuela, G. A. (2017). Monitoring pharmaceuticals and personal care products in reservoir water used for drinking water supply. *Environmental Science and Pollution Research International*, *24*(8), 7335-7347. https://doi.org/10.1007/s11356-016-8253-1

Arrubla, J. P., Cubillos, J. A., Ramírez, C. A., Arredondo, J. A., Arias, C. A., & Paredes, D. (2016). Pharmaceutical and personal care products in domestic wastewater and their removal in anaerobic treatment systems: Septic tank – up flow anaerobic filter. *Ingeniería e Investigación*, *36*(1), 70-78. https://doi.org/10.15446/ing.investig.v36n1.53076.

aus der Beek, T., Weber, F., Bergmann, A., Hickmann, S., Ebert, I., Hein, A., & Küster, A. (2016). Pharmaceuticals in the environment—Global occurrences and perspectives. *Environmental Toxicology and Chemistry*, *35*(4), 823-835. https://doi.org/10.1002/etc.3339

Bedoya-Ríos, D. F., Lara-Borrero, J. A., Duque-Pardo, V., Madera-Parra, C. A., Jimenez, E. M., & Toro, A. F. (2018). Study of the occurrence and ecosystem danger of selected endocrine disruptors in the urban water cycle of the city of Bogotá, Colombia. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, *53*(4), 317-325. https://doi.org/10.1080/10934529.2017.1401372

Bijlsma, L., Botero-Coy, A. M., Rincón, R. J., Peñuela, G. A., & Hernández, F. (2016). Estimation of illicit drug use in the main cities of Colombia by means of urban wastewater analysis. *Science of The Total Environment*, *565*, 984-993. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.05.078

Botero-Coy, A. M., Martínez-Pachón, D., Boix, C., Rincón, R. J., Castillo, N.,

Arias-Marín, L. P., Manrique-Losada, L., Torres-Palma, R., Moncayo-Lasso, A., & Hernández, F. (2018). An investigation into the occurrence and removal of pharmaceuticals in Colombian wastewater. *Science of The Total Environment*, *642*, 842-853. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.088

Bustos Murillo, F. A., Pulido Aponte, Á. E. y Rivera Escobar, H. M. (2023). Tratamiento de aguas residuales en Colombia y sistemas bioelectroquímicos: usos y perspectivas. *Tecnura*, *27*(76), 111-143. https://doi.org/10.14483/22487638.19390

Cacua-Ortiz, S. M., Aguirre, N. J., & Peñuela, G. A. (2020). Methyl Paraben and Carbamazepine in Water and Striped Catfish (*Pseudoplatystoma magdaleniatum*) in the Cauca and Magdalena Rivers. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, *105*(6), 819-826. https://doi.org/10.1007/s00128-020-03028-z

Caviedes-Rubio, D. I., Delgado, D. R. y Amaya, A. O. (2017). Normatividad ambiental dirigida a regular la presencia de los productos farmacéuticos residuales en ambientes acuáticos. *Revista Jurídica Piélagus*, *16*(1). https://journalusco.edu.co/index.php/pielagus/article/download/1445/3604

Cerón-Vivas, A., & Peñuela Mesa, G. A. (2024). Environmental risk assessment of pharmaceutical pollutants in the Oro River Sub-basin (Colombia). *Environmental Research*, *252*, 118951. https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118951

Cleuvers, M. (2004). Mixture toxicity of the anti-inflammatory drugs diclofenac, ibuprofen, naproxen, and acetylsalicylic acid. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *59*(3), 309-315. https://doi.org/10.1016/S0147-6513(03)00141-6

Congreso de la República de Colombia [CRC]. (1993). Ley 99 de 1993. Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones.

da Silva, A. C., Alves de Oliveira, L. V., Amaral Alexandre, L., Rocha Ribas, M., Lemos Dal Pizzol, J., Rocha, G., Kasuko Palmeiro, J., Perin, M., Hoff, R., & Verruck, S. (2025). Suspect screening and quantitative analysis of 165 contaminants of emerging concern in water, sediments, and biota using LC-MS/MS: Ecotoxicological and human health risk assessment. *Science of The Total Environment*, *963*, 178434. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178434

Das, R., & Raj, D. (2025). Sources, distribution, and impacts of emerging contaminants – a critical review on contamination of landfill leachate. *Journal of Hazardous Materials Advances*, *17*, 100602. https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2025.100602

Dasenaki, M. E., & Thomaidis, N. S. (2015). Multi-residue determination of 115 veterinary drugs and pharmaceutical residues in milk powder, butter, fish tissue and eggs using liquid chromatography–

tandem mass spectrometry. *Analytica Chimica Acta*, *880*, 103-121. https://doi.org/10.1016/j.aca.2015.04.013

Daughton, C., & Ternes, T. (1999). Pharmaceuticals and personal care products in the environment: Agents of subtle change? *Environmental Health Perspectives*, *107*(suppl 6), 907-938. https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC1566206/

Delgado, N., Bermeo, L., Hoyos, D. A., Peñuela, G. A., Capparelli, A., Marino, D., Navarro, A., & Casas-Zapata, J. C. (2020). Occurrence and removal of pharmaceutical and personal care products using subsurface horizontal flow constructed wetlands [Material suplementario]. *Water Research*, *187*, 116448. https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116448

Departamento Administrativo Nacional de Estadística [DANE]. (2025a). *Geoportal del DANE - Codificación Divipola*. https://geoportal.dane.gov.co/geovisores/territorio/consulta-divipola-division-politico-administrativa-de-colombia/

Departamento Administrativo Nacional de Estadística [DANE]. (2025b). *Viviendas, Hogares y Personas (VIHOPE)*. https://dane.maps.arcgis.com/apps/MapSeries/index.html?appid=e53e1178fb1f497cac9b241dbafb1690

Espinosa-Ruiz, C., Manuguerra, S., Morghese, M., García-Beltrán, J. M., Esteban, M. Á., Giuga, M., Messina, C. M., & Santulli, A. (2021). Immunity and inflammatory responses in gilthead sea bream (*Sparus aurata* L.) exposed to sub-lethal mixture of carbamazepine, cadmium chloride and polybrominated diphenyl ether. *Fish & Shellfish Immunology*, *111*, 25-35. https://doi.org/10.1016/j.fsi.2020.12.013

European Commission. (2022a). *Commission Implementing Decision (EU) 2022/1307 of 22 July 2022 establishing a watch list of substances for Union-wide monitoring in the field of water policy pursuant to Directive 2008/105/EC of the European Parliament and of the Council*. https://eur-lex.europa.eu/eli/dec_impl/2022/1307/oj/eng

European Commission. (2022b). Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council amending Directive 2000/60/EC, Directive 2006/118/EC and Directive 2008/105/EC as regards priority substances in the field of water policy (COM/2022/540 final). https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52022PC0540

Fernández, R., Colás-Ruiz, N. R., Martínez-Rodríguez, G., Lara-Martín, P. A., Mancera, J. M., Trombini, C., Blasco, J., & Hampel, M. (2022). The antibacterials ciprofloxacin, trimethoprim and sulfadiazine modulate gene expression, biomarkers and metabolites associated with stress and growth in gilthead sea bream (*Sparus aurata*). *Aquatic Toxicology*, *250*, 106243. https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2022.106243

Fuentes-López, H. J., Jiménez Reyes, L. C. y Pérez Forero, N. A. (2019). La demografía industrial en Colombia: Localización y relocalización de la actividad manufacturera. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, *28*(1), 43-65.

https://doi.org/10.15446/rcdg.v28n1.66823

Gallego-Ríos, S. E., & Peñuela, G. A. (2021). Evaluation of ibuprofen and diclofenac in the main rivers of Colombia and striped catfish *Pseudoplatystoma magdaleniatum*. *Environmental Monitoring and Assessment*, *193*(4), 210. https://doi.org/10.1007/s10661-021-08922-5

Gracia-Lor, E., Martínez, M., Sancho, J. V., Peñuela, G., & Hernández, F. (2012). Multi-class determination of personal care products and pharmaceuticals in environmental and wastewater samples by ultra-high performance liquid-chromatography-tandem mass spectrometry. *Talanta*, *99*, 1011-1023. https://doi.org/10.1016/j.talanta.2012.07.091

Hernández, F., Ibáñez, M., Botero-Coy, A.-M., Bade, R., Bustos-López, M. C., Rincón, J., Moncayo, A., & Bijlsma, L. (2015). LC-QTOF MS screening of more than 1,000 licit and illicit drugs and their metabolites in wastewater and surface waters from the area of Bogotá, Colombia. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, *407*(21), 6405-6416. https://doi.org/10.1007/s00216-015-8796-x

Jacquin, L., Petitjean, Q., Côte, J., Laffaille, P., & Jean, S. (2020). Effects of Pollution on Fish Behavior, Personality, and Cognition: Some Research Perspectives. *Frontiers in Ecology and Evolution*, *8*, 86. https://doi.org/10.3389/fevo.2020.00086

Jiménez-Bambague, E. M., Madera-Parra, C. A. y Peña-Salamanca, E. J. (2020a). Eliminación de compuestos farmacéuticos presentes en el agua residual doméstica mediante un tratamiento primario avanzado. *Ingeniería y Competitividad*, *22*(1). https://doi.org/10.25100/iyc.v22i1.8794

Jiménez-Bambague, E. M., Madera-Parra, C. A., Ortiz-Escobar, A. C., Morales-Acosta, P. A., Peña-Salamanca, E. J., & Machuca-Martínez, F. (2020b). High-rate algal pond for removal of pharmaceutical compounds from urban domestic wastewater under tropical conditions. Case study: Santiago de Cali, Colombia. *Water Science and Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research*, *82*(6), 1031-1043. https://doi.org/10.2166/wst.2020.362

Jiménez-Bambague, E. M., Madera-Parra, C. A., & Machuca-Martinez, F. (2023a). The occurrence of emerging compounds in real urban wastewater before and after the COVID-19 pandemic in Cali, Colombia. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, *33*, 100457. https://doi.org/10.1016/j.coesh.2023.100457

Jiménez-Bambague, E. M., Madera-Parra, C. A., Rangel-Delgado, M. F., Quintero-Martinez, I., Miranda-Mosquera, D., Aristizabal-Apolinar, J. S., & Machuca-Martínez, F. (2023b). Photo-Fenton and Electro-Fenton performance for the removal of pharmaceutical compounds in real urban wastewater. *Electrochimica Acta*, *442*, 141905. https://doi.org/10.1016/j.electacta.2023.141905

Lamb, I., Massam, M., Mills, S., Bryant, R., & Edwards, D. (2024). Global threats of extractive industries to vertebrate biodiver-

sity. *Current Biology*, *34*(16), 3673-3684. e4. https://doi.org/10.1016/j.cub.2024. 06.077

Larsson, D. G. J., & Flach, C.-F. (2022). Antibiotic resistance in the environment. *Nature Reviews. Microbiology*, *20*(5), 257-269. https://doi.org/10.1038/s41579-021-00649-x

Li, X., Shen, X., Jiang, W., Xi, Y., & Li, S. (2024). Comprehensive review of emerging contaminants: Detection technologies, environmental impact, and management strategies. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *278*, 116420. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116420

Lucon-Xiccato, T., Savaşçı, B. B., Merola, C., Benedetti, E., Caioni, G., Aliko, V., Bertolucci, C., & Perugini, M. (2023). Environmentally relevant concentrations of triclocarban affect behaviour, learning, and brain gene expression in fish. *Science of The Total Environment*, *903*, 166717. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166717

Madera-Parra, C. A., Jiménez-Bambague, E. M., Toro-Vélez, A. F., Lara-Borrero, J. A., Bedoya-Ríos, D. F. y Duque-Pardo, V. (2018). Estudio exploratorio de la presencia de microcontaminantes en el ciclo urbano del agua en Colombia: caso de estudio Santiago de Cali. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, *34*(3), 475-487. https://doi.org/10.20937/RICA.2018.34.03.10

Manjarrés-López, D. P., Peña-Herrera, J. M., Benejam, L., Montemurro, N., & Pérez, S. (2023). Assessment of wastewater-borne pharmaceuticals in tissues and body fluids from riverine fish. *Environmental Pollution*, *324*, 121374. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121374

Martínez, J. (2009). The role of natural environments in the evolution of resistance traits in pathogenic bacteria. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, *276*(1667), 2521-2530. https://doi.org/10.1098/rspb.2009.0320

Martínez & Peñuela, G. A. (2012). Analysis of triclosan and 4n-nonylphenol in Colombian reservoir water by gas chromatography-mass spectrometry [Material suplementario]. *Water and Environment Journal*, *27*(3), 387-395. https://doi.org/10.1111/j.1747-6593.2012.00360.x

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [MADS]. (2015a). Decreto 1076 de 2015. Por medio del cual se expide el Decreto único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [MADS]. (2015b). Resolución 0631 de 2015. Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. [MADS]. (2019). Resolución 2184 de 2019. Por la cual se modifica la Resolución 668 de 2016 sobre uso racional de bolsas plásticas y se adoptan otras disposiciones.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. [MAVDT]. (2009). Resolución 0371 de 2009. Por la cual se establecen los elementos que deben ser considerados en los Planes de Gestión de Devolución de Productos Posconsumo de Fármacos o Medicamentos Vencidos.

Microsoft Corporation. (2025). *Microsoft Excel* (Versión de Microsoft 365) [Software informático].

Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., Altman, D. G., & Group, T. P. (2009). Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement. *PLoS Medicine*, *6*(7), e1000097. https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097

Morin-Crini, N., Lichtfouse, E., Liu, G., Balaram, V., Ribeiro, A. R. L., Lu, Z., Stock, F., Carmona, E., Teixeira, M. R., Picos-Corrales, L. A., Moreno-Piraján, J. C., Giraldo, L., Li, C., Pandey, A., Hocquet, D., Torri, G., & Crini, G. (2022). Worldwide cases of water pollution by emerging contaminants: A review. *Environmental Chemistry Letters*, *20*, 2311-2338. https://doi.org/10.1007/s10311-022-01447-4

Ogunwole, G. A., Adeyemi, J. A., Saliu, J. K., & Olorundare, K. E. (2024). A computational analysis of the molecular mechanisms underlying the effects of ibuprofen and dibutyl phthalate on gene expression in fish. *Heliyon*, *10*(11), e31880. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31880

Osuoha, J. O., Anyanwu, B. O., & Ejileugha, C. (2023). Pharmaceuticals and personal care products as emerging contaminants: Need for combined treatment strategy. *Journal of Hazardous Materials Advances*, *9*, 100206. https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2022.100206

Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., … Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, *372*, n71. https://doi.org/10.1136/bmj.n71

Pawłowska, B. (2025). Effects of diclofenac, ibuprofen, ionic liquid and drug-IL mixtures on various environmental elements. *Ecohydrology & Hydrobiology*, *25*(4), 100671. https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2025.100671

Pemberthy, P., Padilla, Y., Echeverri, A., & Peñuela, G. A. (2020). Monitoring pharmaceuticals and personal care products in water and fish from the Gulf of Urabá, Colombia. *Heliyon*, *6*(6), e04215. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04215

Peña-Guzmán, C., Ulloa-Sánchez, S., Mora, K., Helena-Bustos, R., Lopez-Barrera, E., Alvarez, J., & Rodriguez-Pinzón, M. (2019). Emerging pollutants in the urban water cycle in Latin America: A review of the current literature. *Journal of Environmental Management*, *237*, 408-423. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.02.100

Picinini-Zambelli, J., Hilario Garcia, A. L., & Da Silva, J. (2025). Emerging pollutants

in the aquatic environments: A review of genotoxic impacts. *Mutation Research - Reviews in Mutation Research*, *795*, 108519. https://doi.org/10.1016/j.mrrev.2024.108519

Rodrigues, S., Antunes, S. C., Correia, A. T., Golovko, O., Žlábek, V., & Nunes, B. (2019). Assessment of toxic effects of the antibiotic erythromycin on the marine fish gilthead seabream (*Sparus aurata* L.) by a multi-biomarker approach. *Chemosphere*, *216*, 234-247. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.10.124

Serna-Galvis, E. A., Silva-Agredo, J., Botero-Coy, A. M., Moncayo-Lasso, A., Hernández, F., & Torres-Palma, R. A. (2019a). Effective elimination of fifteen relevant pharmaceuticals in hospital wastewater from Colombia by combination of a biological system with a sonochemical process. *The Science of the Total Environment*, *670*, 623-632. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.153

Serna-Galvis, E. A., Botero-Coy, A. M., Martínez-Pachón, D., Moncayo-Lasso, A., Ibáñez, M., Hernández, F., & Torres-Palma, R. A. (2019b). Degradation of seventeen contaminants of emerging concern in municipal wastewater effluents by sonochemical advanced oxidation processes. *Water Research*, *154*, 349-360. https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.01.045

Serna-Galvis, E. A., Botero-Coy, A. M., Rosero-Moreano, M., Lee, J., Hernández, F., & Torres-Palma, R. A. (2022a). An Initial Approach to the Presence of Pharmaceuticals in Wastewater from Hospitals in Colombia and Their Environmental Risk. *Water*, *14*(6), 950. https://doi.org/10.3390/w14060950

Serna-Galvis, E. A., Martínez-Mena, Y. L., Porras, J., Torres-Palma, R. A., Martínez-Mena, Y. L., Porras, J. y Torres-Palma, R. A. (2022b). Antibióticos de alto consumo en Colombia, excreción en orina y presencia en aguas residuales—Una revisión bibliográfica. *Ingeniería y competitividad*, *24*(1). https://doi.org/10.25100/iyc.v24i1.11267

Solano Roa, M. V. y Garavito Cárdenas, G. (2013). Condición de venta de analgésicos antiinflamatorios no esteroides, legalmente autorizados para su comercialización en Colombia. Estrategias de uso racional. *Revista Colombiana de Ciencias Químico - Farmacéuticas*, *42*(2), 145-168. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-74182013000200001

Souza, M. C. O., Rocha, B. A., Adeyemi, J. A., Nadal, M., Domingo, J. L., & Barbosa, F. (2022). Legacy and emerging pollutants in Latin America: A critical review of occurrence and levels in environmental and food samples. *The Science of the Total Environment*, *848*, 157774. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157774

US EPA. (2022). *Fact Sheet: Fifth Contaminant Candidate List (CCL 5)*. https://www.epa.gov/ccl/contaminant-candidate-list-5-ccl-5

Valladales-Restrepo, L. F., Rubio-Londoño, S., Poveda-Martinez, L. F., & Machado-Alba, J. E. (2022). Prescribing Pattern of Analgesics in Colombia. Are there

Differences between Capital Cities and Municipalities? A Cross-Sectional Study. *Drugs - Real World Outcomes*, *9*(3), 487-501. https://doi.org/10.1007/s40801-022-00318-2

Wolf, L., Zwiener, C., & Zemann, M. (2012). Tracking artificial sweeteners and pharmaceuticals introduced into urban groundwater by leaking sewer networks. *Science of The Total Environment*, *430*, 8-19. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.04.059

Zapata, N. I., & Peñuela, G. A. (2021). Modified QuEChERS/UPLC-MS/MS method to monitor triclosan, ibuprofen, and diclofenac in fish *Pseudoplatystoma magdaleniatum*. *Food Analytical Methods*, *14*(6), 1289-1304. https://doi.org/10.1007/s12161-020-01951-9

Material suplementario

Tabla 1.

Caracterización detallada de los estudios de PPCPs incluidos en la revisión sistemática

Departamento	Compuesto estudiado	Compuesto detectado	Tipo de Agua	Concentración(ug/L)	Método analítico	Tiempo de realización del estudio	Bibliografía
Antioquia	Gabapentina, Ibuprofeno, Diclofenaco, Ácido clofíbrico, Valsartán, Irbesartán, Carbamazepina, Furosemida, Benzofenona, Benzofenona-1, Benzofenona-2, Benzofenona-3, Benzofenona-4, Metilparabeno, Etilparabeno, Butilparabeno, Propilparabeno.	Benzofenona, Benzofenona-1, Benzofenona-3, Benzofenona-4, Metilparabeno, Etilparabeno, Butilparabeno, Propilparabeno.	AS, AP	0,002-0,537	SPE-LC-MS/MS	Julio y agosto del 2011	Gracia-Lor et al., 20122012.
Antioquia	Triclosán, 4n-nonilfenol	Triclosán.	AS	0,26-0,9	SPE-GC-MS	Agosto del 2010	Martínez & Peñuela, 2012
Cundinamarca	4-Acetamido-antipirina, 4-formil-aminoantipirina, Acetaminofén, Carbamazepina, CBZ-Diol, Claritromicina, Clindamicina, Codeína, Diclofenaco, Dimetridazol, Gabapentina, Gemfibrozilo, Ibuprofeno, Iopromida, Irbesartán, Ketoprofeno, Levamisol, Lidocaína, Lincomicina, Losartán, Losartán ácido carboxílico, Losartán hidroxi 1, Losartán hidroxi 2, Metformina, Metoprolol, Metronidazol, Naproxeno, Pirantel, Salbutamol, Sulfametoxazol, Trimetoprima, Valsartán, Benzoilecgonina, Cafeína, Cocaína, Metilparabeno, Propilparabeno, Acesulfame, Sacarina, Sucralose.	4-Acetamido-antipirina, 4-formil-aminoantipirina, Acetaminofén, Carbamazepina, CBZ-Diol, Claritromicina, Diclofenaco, Gabapentina, Gemfibrozilo, Ibuprofeno, Iopromida, Irbesartán, Ketoprofeno, Lidocaína, Lincomicina, Losartán, Losartán ácido carboxílico, Losartán hidroxi 1, Losartán hidroxi 2, Metronidazol, Naproxeno, Salbutamol, Sulfametoxazol, Trimetoprima, Valsartán, Benzoilecgonina, Cafeína, Cocaína, Metilparabeno, Propilparabeno, Sacarina, Sucralose.	A-PTAR, E-PTAR, AS	NR	SPE-UHPLC-QTOF-MS	Julio del 2013 y marzo del 2014	Hernández et al., 2015000 emerging contaminants, focused on licit and illicit drugs and their metabolites, has been made in urban wastewaters (both influent and effluent

Departamento	Compuesto estudiado	Compuesto detectado	Tipo de Agua	Concentración(ug/L)	Método analítico	Tiempo de realización del estudio	Bibliografía
Risaralda	Aspirina, Cafeína, Cis-MDJM, Diclofenaco, Galaxólido, Ibuprofeno, Ketoprofeno, Naproxeno, Tonalide.	Aspirina, Cafeína, Cis-MDJM, Diclofenaco, Galaxólido, Ibuprofeno, Ketoprofeno, Naproxeno, Tonalide	A-PTAR, E-PTAR	0,1-78,7	SPE-GC-MS	NR	Arrubla et al., 2016
Cundinamarca, Antioquia	Anfetamina, Metanfetamina, MDMA, Cocaína, Benzoilecgonina, TCH-COOH, 6-MAM, Ketamina.	Anfetamina, Metanfetamina, MDMA, Cocaína, Benzoilecgonina, THC-COOH, 6-MAM, Ketamina.	A-PTAR	0,1-5,02	SPE-UHPLC-MS/MS	Junio del 2015	Bijlsma et al., 2016which a population is exposed to or consume, are excreted unchanged or as metabolites in urine and/or feces, and ultimately end up in the sewer network. Measuring target metabolic residues i.e. biomarkers in raw urban wastewater allows identifying the exposure or use of substances of interest in a community. Up to date, the most popular application of WBE is the estimation of illicit drug use and studies have been made mainly across Europe, which has allowed estimating and comparing drug use in many European cities. However, until now a comprehensive study applying WBE on the most frequently consumed illicit drugs has not been performed in South American countries. In this work, we applied this approach to samples from Colombia, selecting two of the most populated cities: Bogotá and Medellin. Several biomarkers were selected to estimate drug use of cocaine, cannabis, amphetamine, methamphetamine, MDMA (ecstasy

Departamento	Compuesto estudiado	Compuesto detectado	Tipo de Agua	Concentración(ug/L)	Método analítico	Tiempo de realización del estudio	Bibliografía
Antioquia	Benzofenona, Benzofenona-3, Butilparabeno, Ácido clofíbrico, Etilparabeno, Ibuprofeno, Metilparabeno.	Benzofenona, Benzofenona-3, Butilparabeno, Ibuprofeno, Metilparabeno.	AS, PTAP	0,005-0,502	SPE-LC-MS/MS	NR	Aristizábal-Ciro et al., 2017
Cundinamarca	Primidona, Carbamazepina, Trimetoprima, Fluoxetina, 4-tert-octilfenol, Bisfenol A, Estrona, Progesterona.	Carbamazepina, Trimetoprima, Fluoxetina, Bisfenol A, Estrona, Progesterona.	AS, AP, A-PTAR, E-PTAR, AE	0,10-36,92	GC-MS	Diciembre del 2015 y mayo del 2016	Bedoya-Ríos et al., 2018
Cundinamarca, Caquetá, Antioquia, Nariño	Acetaminofén, Azitromicina, Carbamazepina, Ciprofloxacina, Claritromicina, Clindamicina, Diclofenaco, Doxiciclina, Eritromicina, Irbesartán, Losartán, Metronidazol, Naproxeno, Norfloxacina, Sulfametoxazol, Tetraciclina, Trimetoprima, Valsartán, Venlafaxina.	Acetaminofén, Azitromicina, Carbamazepina, Ciprofloxacina, Claritromicina, Clindamicina, Diclofenaco, Doxiciclina, Eritromicina, Irbesartán, Losartán, Metronidazol, Naproxeno, Norfloxacina, Sulfametoxazol, Tetraciclina, Trimetoprima, Valsartán, Venlafaxina.	A-PTAR, E-PTAR, ARH	0,018-78,1	LC-MS/MS	Marzo, agosto, septiembre y octubre del 2016 y abril y julio del 2017	Botero-Coy et al., 2018

Departamento	Compuesto estudiado	Compuesto detectado	Tipo de Agua	Concentración(ug/L)	Método analítico	Tiempo de realización del estudio	Bibliografía
Valle del Cauca	CBZ-Diol, Ibuprofeno, Gemfibrozilo, Naproxeno, Acetaminofén, Carbamazepina, Diclofenaco, Gabapentina, Fenofibrato, Ketoprofeno, N-acetil-4-aminoantipirina, N-formil-4-aminoantipirina, Metoprolol, Iopromida, Iohexol, Ácido diatrizoico, Iopamidol, Ácido iotalámico, Sulfametoxazol, Trimetoprima, Dicloxacilina, Claritromicina, Metronidazol, Deshidrato de eritromicina A, Amoxicilina, Tilosina, Estrona, 4-iso-nonilfenol, Bisfenol A, Estriol;, 4-tert-octilfenol, 17b-estradiol.	CBZ-Diol, Ibuprofeno, Gemfibrozilo, Naproxeno, Acetaminofén, Carbamazepina, Diclofenaco, Gabapentina, Fenofibrato, Ketoprofeno, N-acetil-4-aminoantipirina, N-formil-4-aminoantipirina, Metoprolol, Iopromida, Iohexol, Ácido diatrizoico, Iopamidol, Ácido iotalámico, Sulfametoxazol, Trimetoprima, Dicloxacilina, Claritromicina, Metronidazol, Deshidrato de eritromicina A, Amoxicilina, Tilosina, Estrona, 4-iso-nonilfenol; Bisfenol A, Estriol, 4-tert-octilfenol; 17b-estradiol.	AS, AP, E-PTAR	0,01-13,55	LC-MS/MS	Entre septiembre del 2015 y mayo del 2016	Madera-Parra et al., 2018
Nariño	Acetaminofén, Diclofenaco, Carbamazepina, Venlafaxina, Loratadina, Sulfametoxazol, Trimetoprima, Norfloxacina, Ciprofloxacina, Irbesartán, Valsartán, Eritromicina, Azitromicina, Claritromicina, Clindamicina.	Acetaminofén, Diclofenaco, Carbamazepina, Venlafaxina, Loratadina, Sulfametoxazol, Trimetoprima, Norfloxacina, Ciprofloxacina, Irbesartán, Valsartán, Eritromicina, Azitromicina, Claritromicina, Clindamicina.	ARH	0,04-293,8	UHPLC-MS/MS	NR	Serna et al., 2019acommonly present in HWW, were considered: acetaminophen, diclofenac, carbamazepine, venlafaxine, loratadine, ciprofloxacin, norfloxacin, valsartan, irbesartan, sulfamethoxazole, trimethoprim, clarithromycin, azithromycin, erythromycin and clindamycin. Initially, HWW was characterized in terms of global parameters and the pharmaceuticals content. HWW contained a moderate amount of organic matter (i.e., total organic carbon: 131.56 mg L-1 (C

Departamento	Compuesto estudiado	Compuesto detectado	Tipo de Agua	Concentración(ug/L)	Método analítico	Tiempo de realización del estudio	Bibliografía
Cundinamarca	Diclofenaco, Cocaína, Benzoilecgonina, Carbamazepina, Venlafaxina, Irbesartán, Valsartán, Losartán, Metronidazol, Sulfametoxazol, Trimetoprima, Ciprofloxacina, Norfloxacina, Clindamicina, Claritromicina, Eritromicina, Azitromicina.	Diclofenaco, Cocaína, Benzoilecgonina, Carbamazepina, Venlafaxina, Irbesartán, Valsartán, Losartán, Metronidazol, Sulfametoxazol, Trimetoprima, Ciprofloxacina, Norfloxacina, Clindamicina, Claritromicina, Eritromicina, Azitromicina.	E-PTAR	0,02-2,19	LC-MS/MS	NR	Serna-Galvis et al., 2019bcarbamazepine, venlafaxine, ciprofloxacin, norfloxacin, valsartan, losartan, irbesartan, sulfamethoxazole, clarithromycin, azithromycin, erythromycin, metronidazole, trimethoprim and clindamycin
Antioquia, Córdoba	Metilparabeno, Carbamazepina.	Carbamazepina.	AS	8,03	SPE-UPLC-M/M	Época de lluvia y época seca entre 2017 y 2019	Cacua-Ortiz et al., 2020
Cauca, Valle del Cauca	Carbamazepina, Sildenafilo, Metilparabeno.	Carbamazepina, Sildenafilo, Metilparabeno.	ARH, E-PTAR, A-PTAR, AR, AS, E-PTAP, A-PTAP	0,01-10,66	SPE-LC-MS/MS	NR	Delgado et al., 2020
Antioquia	Triclosán, Ibuprofeno, Diclofenaco.	Triclosán, Ibuprofeno, Diclofenaco.	AS	0,10-1,53	UHPLC-MS/MS	Época de lluvia y época seca entre noviembre del 2018 y abril del 2019	Pemberthy et al., 2020

Departamento	Compuesto estudiado	Compuesto detectado	Tipo de Agua	Concentración(ug/L)	Método analítico	Tiempo de realización del estudio	Bibliografía
Valle del Cauca	CBZ-Diol, Carbamazepina, Gabapentina, Lamotrigina, Primidona, Ácido clofíbrico; Ácido fenofíbrico, Bezafibrato, Etofibrato, Fenofibrato, Gemfibrozilo, Diclofenaco, Fenoprofeno, Ibuprofeno, Indometacina, Ketoprofeno, Naproxeno, Acetaminofén, Diazepam, Oxazepam, Pentoxifilina.	CBZ-Diol, Carbamazepina, Gabapentina; Ácido fenofíbrico, Gemfibrozilo, Diclofenaco, Ibuprofeno, Ketoprofeno, Naproxeno, Acetaminofén, Pentoxifilina.	E-PTAR, A-PTAR	0,05-100,0	HPLC/MS-MS	Época de lluvia y época seca	Jiménez-Bambague et al., 2020a
Valle del Cauca	CBZ-Diol, Carbamazepina, Gabapentina, Lamotrigina, Primidona, Clofibrato, Ácido fenofibrato, Bezafibrato, Etofibrato, Fenofibrato, Gemfibrozilo, Diclofenaco, Fenoprofeno, Ibuprofeno, Indometacina, Ketoprofeno, Naproxeno, Acetaminofén, Diazepam, Oxazepam, Pentoxifilina.	CBZ-Diol, Carbamazepina, Gabapentina, Lamotrigina, Primidona, Clofibrato, Ácido fenofibrato, Bezafibrato, Etofibrato, Fenofibrato, Gemfibrozilo, Diclofenaco, Fenoprofeno, Ibuprofeno, Indometacina, Ketoprofeno, Naproxeno, Acetaminofén, Diazepam, Oxazepam, Pentoxifilina.	E-PTAR, A-PTAR	0,3-39,47	SPE-HPLC/MS - MS	Agosto del 2018 y enero del 2019	Jiménez et al., 2020b
Santander, Antioquia	Ibuprofeno, Diclofenaco.	Diclofenaco.	AS	0,68-17,81	UHPLC-MS/MS	Entre 2017 y 2019	Gallego-Ríos & Peñuela, 2021
Córdoba	Naproxeno, Ibuprofeno, Gemfibrozilo, Cafeína, Triclosán,	Naproxeno, Ibuprofeno, Gemfibrozilo, Cafeína, Triclosán.	AS, AP, AR	0,056-43,38	SPE-HPLC - DAD - FLD	Marzo y abril del 2019	Alean et al., 2021within this group of pollutants we have the emerging pollutants (EP

Departamento	Compuesto estudiado	Compuesto detectado	Tipo de Agua	Concentración(ug/L)	Método analítico	Tiempo de realización del estudio	Bibliografía
Córdoba	Ibuprofeno, Gemfibrozilo, Triclosán, Cafeína, Carbamazepina, Bisfenol A, Etinilestradiol, Progesterona.	Ibuprofeno, Gemfibrozilo, Triclosán, Cafeína, Carbamazepina, Bisfenol A, Etinilestradiol, Progesterona.	SR	0,002-97,27	SPE-HPLC - DAD - FLD	Agosto y octubre del 2019	Alean-Flórez et al., 2021
Antioquia, Risaralda, Nariño	Acetaminofén, Ácido nalidíxico, Ácido oxolínico, Alprazolam, Atorvastatina, Azitromicina, Carbamazepina, Ciprofloxacina, Claritromicina, Clindamicina, Diclofenaco, Enalapril, Eritromicina, Fenazona, Flumequina, Furaltadona, Gabapentina, Iopromida, Irbesartán, Levamisol, Lincomicina, Lorazepam, Losartán, Metoprolol, Metronidazol, Norfloxacina, Omeprazole, Pantoprazol, Primidona, Roxithromycin, Salbutamol, Sulfadiazina, Sulfametoxazol, Tetraciclina, Tramadol, Trimetoprima, Valsartán, Venlafaxina.	Acetaminofén, Ácido nalidíxico, Ácido oxolínico, Alprazolam, Atorvastatina, Azitromicina, Carbamazepina, Ciprofloxacina, Claritromicina, Clindamicina, Diclofenaco, Enalapril, Eritromicina, Fenazona, Flumequina, Furaltadona, Gabapentina, Iopromida, Irbesartán, Levamisol, Lincomicina, Lorazepam, Losartán, Metoprolol, Metronidazol, Norfloxacina, Omeprazole, Pantoprazol, Primidona, Roxithromycin, Salbutamol, Sulfadiazina, Sulfametoxazol, Tetraciclina, Tramadol, Trimetoprima, Valsartán, Venlafaxina.	ARH	0,02-667,79	LC-MS/MS	Época de lluvia y época seca	Serna et al., 2022achemical oxygen demand was between 235.5 and 1203 mg L−1, and conductivity ranged from 276.5 to 717.5 μS cm−1. Additionally, most of the target pharmaceuticals (20 of 38

Departamento	Compuesto estudiado	Compuesto detectado	Tipo de Agua	Concentración(ug/L)	Método analítico	Tiempo de realización del estudio	Bibliografía
Valle del Cauca	CBZ-Diol, Carbamazepina, Gabapentina, Lamotrigina, Ácido fenofíbrico, Gemfibrozilo, Ibuprofeno, Ketoprofeno, Diclofenaco, Naproxeno, Acetaminofén.	CBZ-Diol, Carbamazepina, Gabapentina, Lamotrigina; Ácido fenofíbrico, Gemfibrozilo, Ibuprofeno, Ketoprofeno, Diclofenaco, Naproxeno, Acetaminofén.	E-PTAR	0,05-180,0	HPLC/MS-MS	Época de lluvia y época seca	Jiménez et al., 2023a
Valle del Cauca	CBZ-Diol, Carbamazepina, Gabapentina, Lamotrigina, Ácido fenofíbrico, Gemfibrozilo, Diclofenaco, Ibuprofeno, Ketoprofeno, Naproxeno, Acetaminofén, Pentoxifilina, Venlafaxina.	CBZ-Diol, Carbamazepina, Gabapentina, Lamotrigina, Ácido fenofíbrico, Gemfibrozilo, Diclofenaco, Ibuprofeno, Ketoprofeno, Naproxeno, Acetaminofén, Pentoxifilina, Venlafaxina.	E-PTAR	0,02-180,0	HPLC/MS-MS	NR	Jiménez-Bambague et al., 2023b
Santander	Diclofenaco, Ibuprofeno, Doxiciclina, Cefalexina, Carbamazepina, Triclosán.	Diclofenaco, Dicloxacilina, Triclosán.	AS	0,05-13,0	SPE-UHPLC - MS/MS	Octubre y noviembre del 2021 y junio y agosto del 2022	Cerón & Peñuela, 2024

Fuente: autores.

NR: no reporta; SPE: extracción de fase solida; HPLC: cromatografía líquida de alta eficiencia; UPHLC: cromatografía líquida de alto rendimiento; GC: cromatografía de gases; MS: casas; QTOF: cuadrupolo – tiempo de vuelo; DAD: detector de arreglo de diodos; FLP: detector de arreglo de diodos; AS: aguas superficiales (ríos, lagos, lagunas); E-PTAR: efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales; A-PTAR: afluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales; AP: aguas potables; ARH: aguas residuales hospitalarias; AR: aguas residuales; PTAP: planta de tratamiento de aguas potables; A-PTAP: afluente de planta de tratamiento de aguas potables; E-PTAP: efluente de planta de tratamiento de aguas potables; AE: agua de escorrentía y SR: sistemas de riego.

Tabla S2.

Clasificación de los productos farmacéuticos y de cuidado personal detectados en Colombia

Clase de producto farmacéutico	Compuesto
Agentes antimicrobianos	Triclosán
Analgésicos y antinflamatorios	Acetaminofén
	Aspirina
	Codeína
	Diclofenaco
	Fenazona
	Fenoprofeno
	Ibuprofeno
	Indometacina
	Ketoprofeno
	N-acetil-4-aminoantipirina
	Naproxeno
	N-formil-4-aminoantipirina
	Tramadol
Antibióticos	Ácido nalidíxico
	Ácido oxolínico
	Amoxicilina
	Azitromicina
	Cefalexina
	Ciprofloxacina
	Claritromicina
	Clindamicina
	Dicloxacilina
	Doxiciclina

Clase de producto farmacéutico	Compuesto
Antibióticos	Eritromicina
	Flumequina
	Furaltadona
	Lincomicina
	Norfloxacina
	Roxitromicina
	Sulfadiazina
	Sulfametoxazol
	Tetraciclina
	Tilosina
	Trimetoprima
Antihipertensivos	Enalapril
	Furosemida
	Irbesartán
	Losartán
	Losartán ácido carboxílico
	Losartán hidroxi 1
	Losartán hidroxi 2
	Valsartán
Antiparasitarios	Dimetridazol
	Levamisol
	Metronidazol
	Pirantel

Clase de producto farmacéutico	Compuesto
Conservantes	Butilparabeno
	Etilparabeno
	Metilparabeno
	Propilparabeno
Drogas ilícitas	6-monoacetilmorfina
	Anfetamina
	Benzoilecgonina
	Cocaína
	Ketamina
	MDMA
	Metanfetamina
	TCH-COOH
Endulzantes	Acesulfamo
	Sacarina
	Sucralosa
Fenoles	4-iso-nonilfenol
	4n-nonilfenol
	4-terc-octilfenol
	Bisfenol A
Filtros UV de protectores solares	Benzofenona
	Benzofenona-1
	Benzofenona-2
	Benzofenona-3
	Benzofenona-4
Fragancias	Galaxolide
	Tonalide

Clase de producto farmacéutico	Compuesto
Hormonas	17β-estradiol
	Estriol
	Estrona
	Etinilestradiol
	Progesterona
Medicamentos antiepilépticos	Carbamazepina
	CBZ-Diol
	Gabapentina
	Lamotrigina
	Primidona
Medicamentos metabólicos	Metformina
	Omeprazol
	Pantoprazol
	Sildenafilo
Productos médicos	Lidocaína
	Pentoxifilina
	Salbutamol
Medios de contraste	Ácido diatrizoico
	Ácido iotalámico
	Iohexol
	Iopamidol
	Iopromida
Metabolitos farmacéuticos	4-acetamido-antipirina
	4-formil-aminoantipirina
	Cis-MDJM
	Eritromicina A deshidratada

Clase de producto farmacéutico	Compuesto
Neurológicos	Alprazolam
	Cafeína
	Diazepam
	Fluoxetina
	Loratadina
Neurológicos	Lorazepam
	Oxazepam
	Venlafaxina
Reguladores de lípidos en sangre	Ácido clofíbrico
	Ácido fenofíbrico
	Atorvastatina
	Bezafibrato
	Clofibrato
	Etofibrato
	Fenofibrato
	Gemfibrozilo
β-bloqueadores	Metoprolol

Fuente: autores.

Conflicto de intereses
Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Licencia de Creative Commons
Revista de Investigación Agraria y Ambiental is licensed under a Creative Commons Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual 4.0 Internacional License.

Fecha de recibido: 10-09-2025
Fecha de aceptado: 23-02-2026
DOI: 10.22490/21456453.10157

CONFLICTOS TERRITORIALES ENTRE USO Y VOCACIÓN DEL SUELO EN LA REGIÓN DEL CATATUMBO, COLOMBIA

TERRITORIAL CONFLICTS BETWEEN LAND USE AND LAND SUITABILITY IN THE CATATUMBO REGION, COLOMBIA

Alexander Armesto Arenas[1]

José Manuel Alba Maldonado[2]

Wilson Angarita Castilla[3]

Citación: Armesto, A., Alba, J. M. y Angarita, W. (2026). Conflictos territoriales entre uso y vocación del suelo en la región del Catatumbo, Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, *17*(2), 285–330. https://doi.org/10.22490/21456453.10157

[1]Magíster en Gestión Ambiental, Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, Ocaña, Colombia. aarmestoa@ufpso.edu.co

[2]Doctor, Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, Ocaña, Colombia. jmalbam@ufpso.edu.co

[3]Magíster en Gestión Ambiental, Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, Ocaña, Colombia. wangaritac@ufpso.edu.co

RESUMEN

Contextualización: Esta investigación se centró en la región del Catatumbo, departamento de Norte de Santander, Colombia, la cual enfrenta una diversidad de conflictos territoriales por causa de uso inadecuado del suelo, cultivos ilícitos, la ganadería extensiva y la expansión demográfica.

Vacío de conocimiento: Hasta el momento, las investigaciones en la zona del Catatumbo eran parciales, descriptivas y carecían de correlaciones estadísticas sólidas entre oferta ambiental, conflicto y vocación de uso del suelo. Por el contrario, en este estudio, se hace un análisis integral y cuantitativo de los conflictos de uso del suelo en relación con su vocación y la oferta ambiental, utilizando el análisis factorial múltiple (AFM). Así mismo se logra conocer la importancia de las áreas protegidas y resguardos indígenas en la mitigación de conflictos, frente a municipios sin figuras de protección.

Propósito: En este escenario investigativo se tuvo como objetivo identificar y analizar los conflictos entre uso y vocación del suelo en los municipios de la región del Catatumbo, departamento de Norte de Santander, Colombia.

Metodología: La metodología se basó en un análisis factorial múltiple (AFM), utilizando 54 variables obtenidas de fuentes oficiales (IGAC, ICA, UNODC, FAO, UPRA, entre otras). Esta técnica estadística permitió representar y comparar variables de uso, oferta ambiental y conflictividad territorial en un espacio común, facilitando la identificación de patrones.

Resultados y conclusiones: La implementación del AFM nos permitió describir el Catatumbo en cuatro dimensiones, la primera representada por territorios con una oferta ambiental amplia, enfocada en la productividad y procesos conservacionistas acompañados de la distorsión derivada de la subutilización o sobreutilización del suelo. La segunda dimensión, representada por municipios conservacionistas con una oferta ambiental factible para una producción agrícola, forestal y pecuaria con moderados conflictos de usos del suelo. La tercera dimensión, relacionada con municipios con mayor conflicto por sobreutilización y presión sobre los recursos naturales, y la cuarta dimensión influenciada por municipios con baja influencia sobre el Catatumbo con características propias sobre sus territorios con características conservacionistas, regulaciones bien marcadas y conflictos moderados. Así mismo, se evidencia que las zonas más ricas en recursos naturales son las más impactadas. Debido a esto, es significativamente necesario fortalecer la planificación territorial, implementar componentes jurídicos de conservación y acoplar el uso del suelo con criterios ambientales para resguardar la funcionalidad ecológica del Catatumbo.

Palabras clave: aprovechamiento de recursos, conservación ambiental, conflicto social, derecho al control de los recursos naturales, gestión de recursos, recursos del suelo.

ABSTRACT

Contextualization: This research focused on the Catatumbo region, Department of Norte de Santander, Colombia, which faces a variety of territorial conflicts due to inappropriate land use, illicit crops, extensive cattle ranching and demographic expansion.

Knowledge gap: Until now, research in the Catatumbo area was partial, descriptive and lacked solid statistical correlations between environmental supply, conflict and land use suitability. Conversely, this study conducts a comprehensive and quantitative analysis of land use conflicts in relation to its suitability and environmental supply using Multiple Factor Analysis (MFA). It also highlights the importance of protected areas and indigenous reserves in the mitigation of conflicts, compared to municipalities without protected areas.

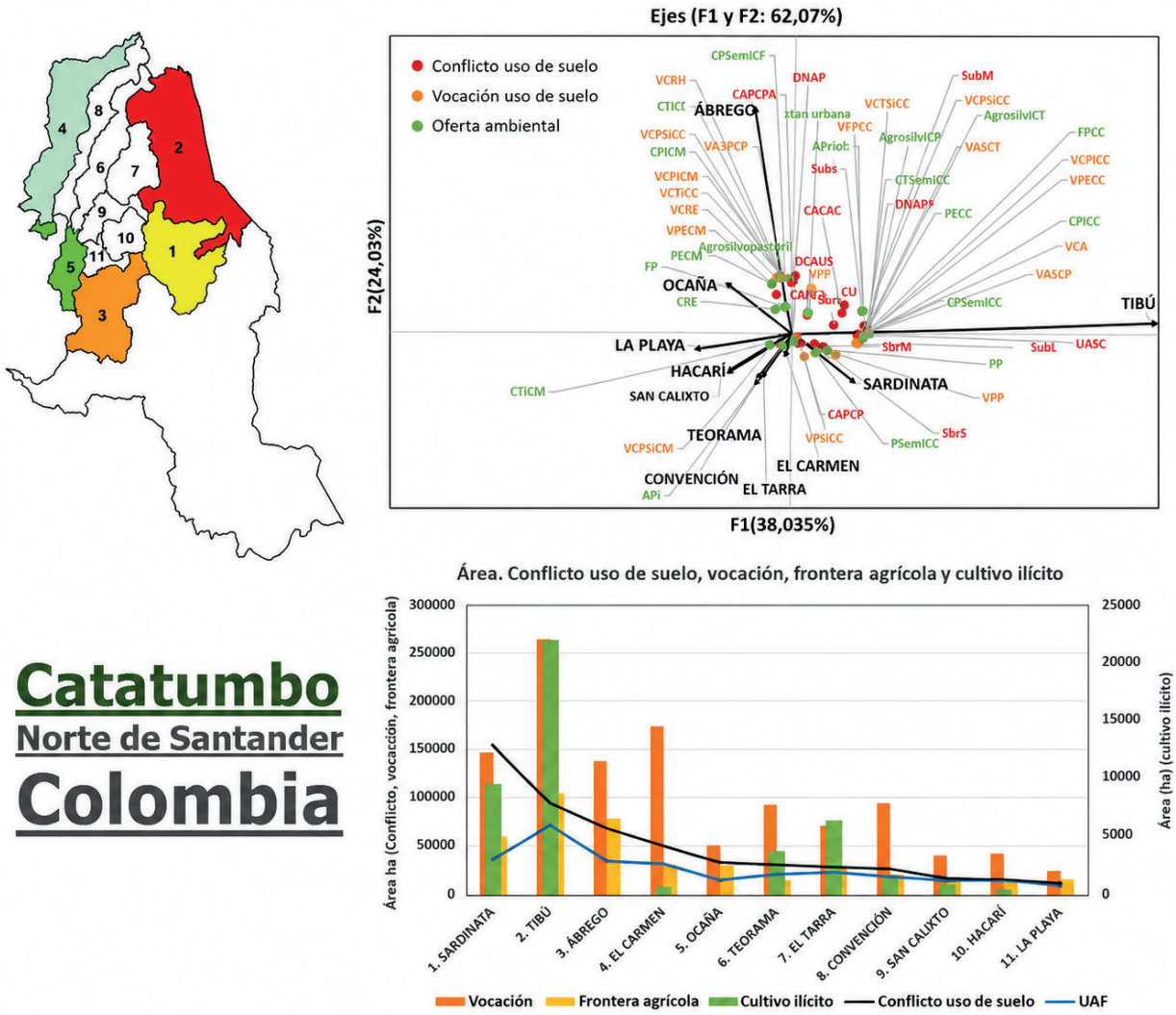
Objective: To identify and analyze, in this research scenario, the conflicts between land use and suitability in the municipalities of the Catatumbo region, Department of Norte de Santander, Colombia.

Methodology: The methodology was based on a Multiple Factor Analysis (MFA), using 54 variables obtained from official sources (IGAC, ICA, UNODC, FAO, UPRA, among others). This statistical technique made it possible to represent and compare variables of use, environmental supply and territorial conflict in a common space, facilitating the identification of patterns.

Results and conclusions: The implementation of the MFA allowed us to describe Catatumbo in four dimensions, the first represented by territories with a wide environmental offer focused on productivity and conservation processes accompanied by the distortion derived from the underutilization and overutilization of the soil. The second dimension, represented by conservationist municipalities with a feasible environmental offer for agricultural, forestry and livestock production with moderate land use conflicts. The third dimension is related to municipalities with greater conflict due to overexploitation and pressure on natural resources and the fourth dimension relates to municipalities with low influence on Catatumbo with their own characteristics on their territories, more conservationist in nature, well-marked regulations and moderate conflicts. It is also evident that the areas richest in natural resources are the most impacted. As a result, there is a significant need to strengthen territorial planning, implement legal conservation components, and link land use to environmental criteria in order to safeguard the ecological functionality of Catatumbo.

Keywords: Resource development, environmental conservation, social conflict, right to control natural resources, resource management, land resources.

RESUMEN GRÁFICO



Fuente: autores.

1 INTRODUCCIÓN

A nivel global, los conflictos en el uso del suelo se presentan por diversas causas que varían según las condiciones regionales o nacionales. En China, por ejemplo, dichos conflictos se deben principalmente al crecimiento urbano, la industrialización y la explotación de minas de carbón (Zou et al., 2021; Gao et al., 2021). En Alemania, la expansión de plantas fotovoltaicas ha generado tensiones sobre el uso del suelo (Fienitz & Siebert, 2023), mientras que, en Dinamarca, el turismo costero ha ocasionado una alta conflictividad por el exceso de visitantes, actividades ilegales y cambios

en la planificación territorial, afectando negativamente el paisaje, el acceso público y la infraestructura (Hjalager, 2020).

En Colombia, la diversidad geográfica y ecológica ha dado lugar a un complejo sistema de figuras de ordenamiento territorial, tales como parques nacionales, reservas forestales y territorios indígenas, destinadas a la protección de los ecosistemas (Resolución 110, 2022). Dentro de la región Andina se encuentra el Catatumbo, ubicado en el departamento de Norte de Santander, en la frontera de Colombia con Venezuela. Esta región se caracteriza por una topografía compleja y una alta variabilidad climática, condiciones que favorecen las actividades agropecuarias (Peñaranda-Peñaranda et al., 2022; Castellanos-Mejía et al., 2021). Sin embargo, esta riqueza natural contrasta con el manejo inadecuado de los recursos (Bürgesser et al., 2012).

El Catatumbo ha sido fuertemente intervenido debido a la explotación de recursos naturales como carbón y petróleo, muchas veces a través de prácticas ilegales (Rincon, 2020; Quintero-Ángel & Ospina-Salazar, 2022). Además, los cultivos ilícitos, en especial el de coca, han aumentado considerablemente en zonas destinadas originalmente a la conservación ambiental (Bernal et al., 2021; Ríos et al., 2023).

Según el documento CONPES 3739 (Consejo Nacional de Política Económica y Social, 2013), la vocación del suelo en el Catatumbo se distribuye de la siguiente manera: conservación (57,6 %), agroforestal (19 %), agricultura (13,1 %), ganadería (5 %) y forestal (4,8 %). A pesar de la prevalencia de cultivos de coca, esta distribución respalda una producción diversificada de cultivos permanentes y transitorios, (Peñaranda-Peñaranda et al., 2022). Conjuntamente, también se contempla un ordenamiento social liderado por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural a través del Instituto Colombiano de Desarrollo Rural (Incoder), reconociendo la vocación de 194.000 ha en la zona de reserva forestal.

Frente a este panorama, la gestión de los recursos naturales y el uso del suelo representan un reto significativo que exige un enfoque equilibrado entre la sostenibilidad ambiental y el bienestar humano. Esta investigación, desde un enfoque espacial, analiza el uso del suelo en el Catatumbo, respondiendo a la pregunta: ¿Cuáles zonas del Catatumbo están significativamente afectadas y qué prácticas agropecuarias tienen un impacto adverso relevante sobre los recursos naturales? Partiendo de la hipótesis de que la zona está fuertemente impactada por prácticas agropecuarias no sostenibles, en especial por la presencia de cultivos ilícitos. De este modo, el objetivo de esta investigación es, mediante la implementación del análisis factorial múltiple (AFM), identificar en cada uno de los municipios del Catatumbo, los conflictos de uso del suelo más relevantes sus causas y su relación con la vocación y la oferta ambiental. Con ello también se busca evaluar de manera robusta las correlaciones entre las variables de interés e identificar los municipios más impactados, aportando material pertinente para la gestión territorial en el departamento de Norte de Santander, Colombia.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se desarrolló en la región del Catatumbo, Norte de Santander, con una superficie de 11.399 km², equivalente al 50,34 % del departamento (Figura 1). Su economía se basa en actividades agropecuarias, extracción de hidrocarburos y comercio. La topografía presenta una altitud promedio de 2.280 msnm, con temperaturas entre 8 °C y más de 32 °C. Según el Departamento Nacional de Planeación (DNP, 2013) y el Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas (DANE, 2018) está compuesto por 11 municipios, con una población total de 190.387 habitantes.

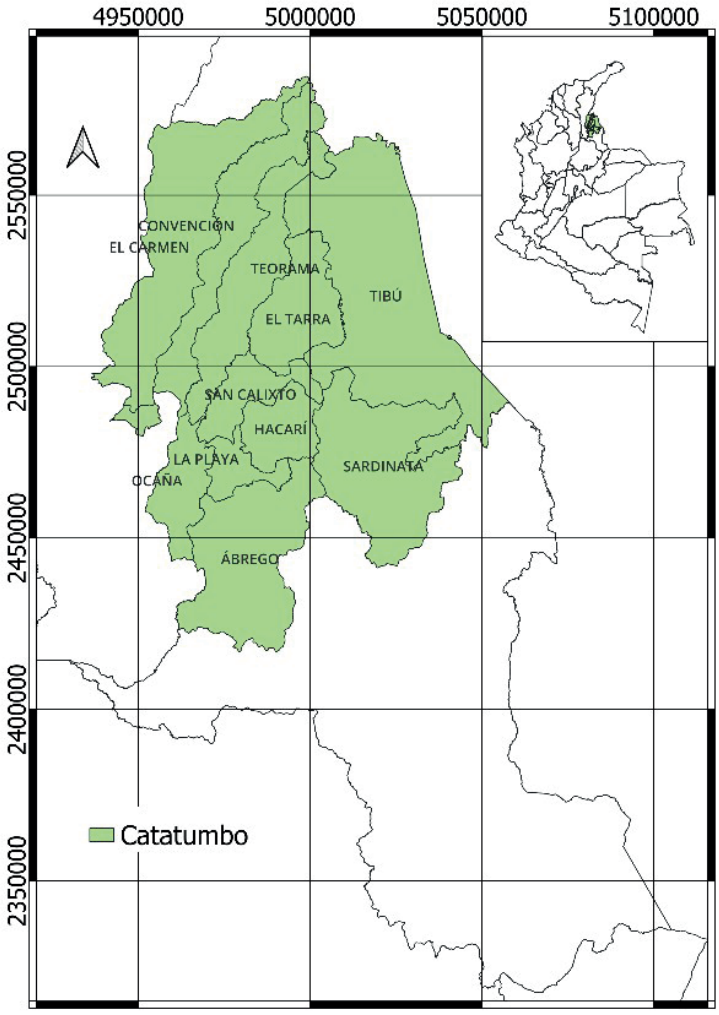


Figura 1. Ubicación geográfica del Catatumbo. Norte de Santander

Fuente: DNP (2013).

Modelos estadísticos implementados

Se aplicó el modelo de análisis factorial múltiple (AFM), que fue desarrollado por Escofier y Pagès (1992). Desde la perspectiva de Moncada Herrera (2007), este modelo nos permite conocer las relaciones entre grupos de variables, la relaciones entre las variables que pertenecen a cada uno de los grupos y la semejanza entre las observaciones.

Teniendo en cuenta a los autores mencionados, este modelo estadístico se podría sintetizar en las siguientes etapas:

1. **Definición de la estructura de los datos.** Hace referencia a la identificación de grupo de variables (tablas). Para este caso de estudio se definieron tres tablas:
   - Conflicto de uso de suelo con 15 variables
   - Vocación de usos de suelo con 19 variables
   - Oferta ambiental con 20 variables
2. **Análisis de componentes principales (ACP) por grupos de variables.** Al respecto, cada uno de los bloques mencionados se analiza por separado mediante ACP, se calcula la varianza de cada uno de los respectivos grupos, y se ponderan los grupos para nivelar su influencia en el análisis global.
3. **Síntesis global de todos los bloques mediante un ACP.** Se realiza el AFM, lo cual se unen o se concatenan todos los grupos o tablas correspondientes a diferentes grupos de variables, formando una sola tabla global, para luego realizar un ACP global. En este paso se sintetizan todos los grupos en un espacio común, en el cual se muestran todas las variables por grupo y a su vez se obtiene el grado de correlación de cada una de ellas con las observaciones y con los nuevos factores o dimensiones, su respectiva contribución en la variabilidad, contribución de las observaciones, correlaciones entre grupos.
4. **Visualización y síntesis gráfico.** Mediante esquemas gráficos se sintetizan las correlaciones entre grupos de variables, entre factores y variables de cada grupo, las contribuciones de cada una de las variables y el porcentaje de variabilidad de cada uno de los factores.
5. **Determinación de robustez del modelo implementado AFM.** Para este fin se desarrolló el análisis de sensibilidad por selección de variables. Sobre esto se probó el análisis factorial múltiple, descartando bloques (conflicto, vocación, oferta) y los municipios críticos (Tibú, Sardinata, Ábrego), conjuntamente se desarrolló en análisis de sensibilidad a la ponderación de grupos, en la cual se simularon escenarios con pesos distintos (60/20/20, 40/30/30); adicionalmente, se aplicó análisis de sensibilidad a la escala de datos, en la cual se aplicaron transformaciones Z-score, Min-Max, log y, por último, se implementó la validación cruzada.

Adicional a lo anterior, con el propósito de disminuir el grado de influencia de los grupos de variables en el AFM, se implementó un criterio de ponderación estándar del AFM (1/λ1), ajustado al número de variables de cada grupo. Con lo mencionado se asegura que los grupos con más cantidad de variables no tengan dominancia sobre el análisis, frente a los grupos con menos variables. De esta forma y, cada bloque contribuye los factores de forma equitativa.

Los factores hallados son dimensiones que agrupan las variables con mayor peso explicativo dentro de cada grupo (tablas 1, 2 y 3), resumiendo partes comunes entre las respectivas tablas. Al respecto, las variables que más contribuyen a un factor son las que tienen mayor correlación muestran con el respectivo factor.

Tabla 1.

Clasificación de tierra según conflicto de uso de suelo

Abreviatura	Significado
CACAC	Conflictos en áreas de cuerpos de agua
CAPCP	Conflictos en áreas pantanosas con cultivos permanentes
CAPCT	Conflictos en áreas pantanosas con cultivos transitorios
CAPCPA	Conflictos en áreas pantanosas con pastos
CU	Conflictos urbanos
DNAP	Demanda no disponible en áreas a proteger (nubes)
DNAPP	Demanda no disponible en áreas para producción
OCAUS	Otras coberturas artificializadas (urbanas y suburbanas)
SbrL	Sobreutilización ligera
SbrM	Sobreutilización moderada
SbrS	Sobreutilización severa
SubL	Subutilización ligera
SubM	Subutilización moderada
SubS	Subutilización severa
UASC	Usos adecuados o sin conflicto

Tabulación: autores.

Fuente: Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) (s. f.).

Tabla 2.

Vocación de uso del suelo

Abreviatura	Significado
VASCP	Agrosilvícola con cultivos permanentes
VASCT	Agrosilvícola con cultivos transitorios
VASCP	Agrosilvopastoril con cultivos permanentes
VCRH	Conservación de recursos hidrobiológicos
VCRE	Conservación y recuperación erosión
VCA	Cuerpo de agua
VCPICC	Cultivos permanentes intensivos de clima cálido
VCPICM	Cultivos permanentes intensivos de clima medio
VCPSICC	Cultivos permanentes semintensivos de clima cálido
VCPSICF	Cultivos permanentes semintensivos de clima frío
VCPSICM	Cultivos permanentes semintensivos de clima medio
VCTICC	Cultivos transitorios intensivos de clima cálido
VCTSICC	Cultivos transitorios semintensivos de clima cálido
VFPCC	Forestal de producción de clima cálido
VFP	Forestal de protección
VPECC	Pastoreo extensivo de clima cálido
VPECM	Pastoreo extensivo de clima medio
VPSICC	Pastoreo semintensivo de clima cálido
VPP	Protección – producción

Tabulación: autores.

Fuente: IGAC (s. f.).

Tabla 3.
Oferta ambiental

Abreviatura	Significado
AgrosilviCP	Agrosilvícola con cultivos permanentes
AgrosilviCT	Agrosilvícola con cultivos transitorios
AgrosilvopasCP	Agrosilvopastoril con cultivos permanentes
APL	Áreas de protección legal
APrioC	Áreas prioritarias para la conservación
CRE	Conservación y recuperación erosión
CPICC	Cultivos permanentes intensivos de clima cálido
CPICM	Cultivos permanentes intensivos de clima medio
CPSemICC	Cultivos permanentes semintensivos de clima cálido
CPSemICF	Cultivos permanentes semintensivos de clima frío
CTICM	Cultivos permanentes semintensivos de clima medio
CTICC	Cultivos transitorios intensivos de clima cálido
CTSemICC	Cultivos transitorios semintensivos de clima cálido
FPCC	Forestal de producción de clima cálido
FP	Forestal de protección
PECC	Pastoreo extensivo de clima cálido
PECM	Pastoreo extensivo de clima medio
PSemICC	Pastoreo semintensivo de clima cálido
PP	Protección - producción
zona urbana	Zonas urbanas

Tabulación: autores.

Fuente: IGAC (s. f.).

Con el fin de dar respuesta a la pregunta problema y constatar la hipótesis, en esta investigación, los diferentes tipos de cultivos agrícolas y prácticas pecuarias no se incluyeron como variables propiamente en el AFM, debido a que estas se desarrollan dentro de las categorizaciones mostradas en las anteriores tablas. Mencionado esto, para

las prácticas agrícolas y pecuarias dentro de los respectivos análisis, de forma cartográfica se entrecruzaron datos suministrados por el IGAC (s. f.) (oferta ambiental, vocación y conflicto de uso de suelo), datos de cultivos ilícitos entregados por las Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito (UNODC), información sobre frontera agrícola y expansión de la Unidad Agrícola Familiar (UAF), dada por la unidad técnica del Ministerio de Agricultura, UPRA (Unidad de Planificación Rural Agropecuaria) mediante el SIPRA (Sistema de Información para la Planificación Rural Agropecuaria). Una vez entrecruzados, con la ayuda del *software* QGIS, se identificó cómo los UAF y los cultivos ilícitos se identifican en los diferentes tipos de conflicto de uso de suelo, con lo cual se logró obtener su respectivo grado de influencia, teniendo en cuenta los resultados del AFM.

Para el análisis de correlación se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson. El uso del coeficiente de Pearson se implementó debido a que las variables son cuantitativas continuas, con lo cual se logra obtener relaciones lineales más precisas. Para su calificación se utilizó la categorización mostrada en la tabla 4.

Tabla 4.
Categorización de índices de correlación de Pearson

Categorización	Nula	Muy baja	Baja	Moderada	Alta	Muy alta
Intervalo r	0	± (0-0,2]	± (0,2-0,4]	± (0,4-0,6]	± (0,6-0,8]	± (0,8-1]

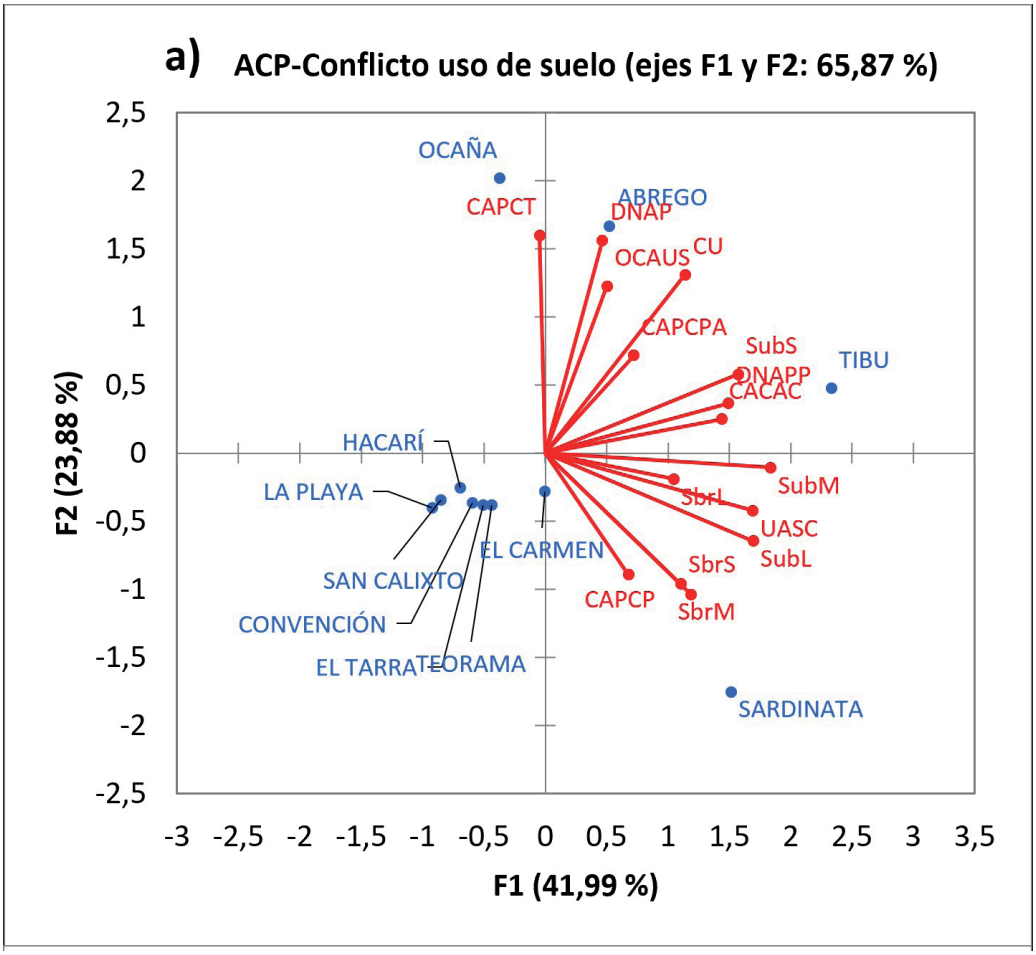
Fuente: autores.

El *software* estadístico utilizado para implementar el AFM fue XLSTAT, con el coeficiente de correlación de Pearson. Igualmente, para conocer el grado de novedad de la presente investigación se implementó la IA Perplexity con el propósito de conocer los análisis faltantes que se debían hacer de los resultados encontrados con la implementación del AFM.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El Catatumbo ofrece ambientalmente un área de 1136303,881 ha y su vocación se reparte como lo muestra la tabla 2. En cuanto al área conflicto de uso de suelo, se encontró que el Catatumbo tiene un área total de 528896,4747 ha. En los análisis separados (ACP) se evidencia una distribución diferente para cada uno de los grupos, como se muestra la figura 2, en la cual se explican dos ejes o factores (F1 y F2) que representa el 65,87 %, 74,99 % y 60,99 % de variabilidad para conflicto de uso de suelo, vocación y oferta ambiental, respectivamente. En lo concerniente a esto se exhiben dos situaciones

bien marcadas, en una de ellas los municipios de Hacarí, La Playa, Convención, San Calixto y El Tarra exhiben áreas con una baja representación en cuanto a los diversos conflictos de usos de suelo; en contraste, la oferta ambiental, vocación y conflicto de uso de suelo se proyecta en los factores mencionados en el orden de Tibú, Ábrego, Sardinata y Ocaña, respectivamente (Figuras 2a, 2b y 2c).



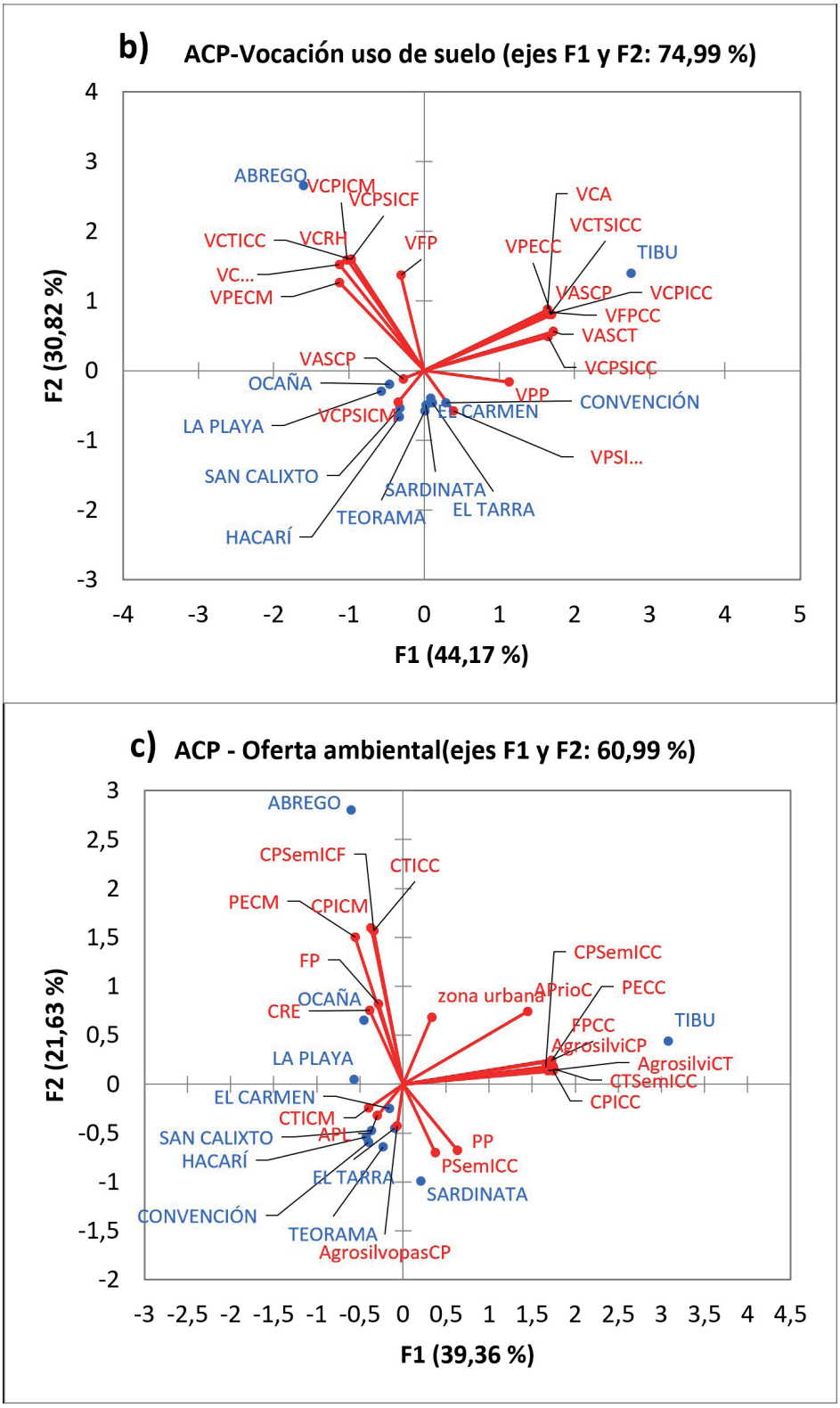


Figura 2. Análisis de componentes principales

Fuente: autores.

En contraste, municipios resguardados por la Ley 2 de 1959, como El Carmen, Convención y El Tarra cuentan con áreas protegidas como el Parque Nacional Natural Motilón Barí y Motilón Barí, que actúan como barreras de contención. Estas zonas, especialmente al norte, muestran menor intensidad en los conflictos. Aunque los cultivos ilícitos son un problema relevante, no representan el principal factor en los conflictos de uso y vocación del suelo. No obstante, aparte de estos municipios, los demás carecen de normas de protección territorial que regulen legalmente el uso del suelo. Acerca de ello, en este estudio, la tabla 5 y la figura 3 muestran el índice de correlación que alcanza el conflicto de uso del suelo con la vocación de uso del suelo y la oferta ambiental, con valores de 0,70 y 0,846, respectivamente. Algo similar a otras zonas de Colombia, esto explica cómo en la zona del Catatumbo existe una contrariedad entre lo que se trabaja y lo que el suelo está destinado a tolerar (Torres-Alape et al., 2024). Estos comportamientos han de esperarse ante la actuación que tiene el ser humano cuando quiere una utilidad inmediata sin tener en cuenta las repercusiones adversas sobre su entorno y su sostenibilidad.

Tabla 5.

Coeficientes RV

	Conflicto de uso de suelo	Vocación de uso de suelo	Oferta ambiental	AFM
Conflicto de uso del suelo	1,000	0,707	0,846	0,903
Vocación de uso del suelo	0,707	1,000	0,932	0,936
Oferta ambiental	0,846	0,932	1,000	0,984
AFM	0,903	0,936	0,984	1,000

Fuente: autores.

De acuerdo con el análisis global del AFM se observa que los dos primeros factores obtenidos en el AFM representan un porcentaje medio de variabilidad (60,067 %) (Tabla 6), los cual se hace rigurosamente necesario tomar los cuatro primeros factores que explican el 85, 55%.

Tabla 6.

Contribución de variabilidad de los factores

	F1	F2	F3	F4
Valor propio	2,733	1,727	1,081	0,606
Variabilidad (%)	38,035	24,031	15,047	8,439
% acumulado	38,035	62,067	77,113	85,552

Fuente: autores.

Conforme a la observación desglosada del AFM, se observa que, por extensión y variabilidad, en el Catatumbo se resaltan cuatro municipios en cuanto a conflictividad de uso de suelo, vocación y oferta ambiental: Tibú, Ábrego, Sardinata, Ocaña y El Carmen.

La figura 3 muestra las variables con alta inercia ($Cos^2 > 0,75$) que a su vez presentan alta correlación con los cuatro primeros factores. Esto da a entender que las variables están bien explicadas en el respectivo factor.

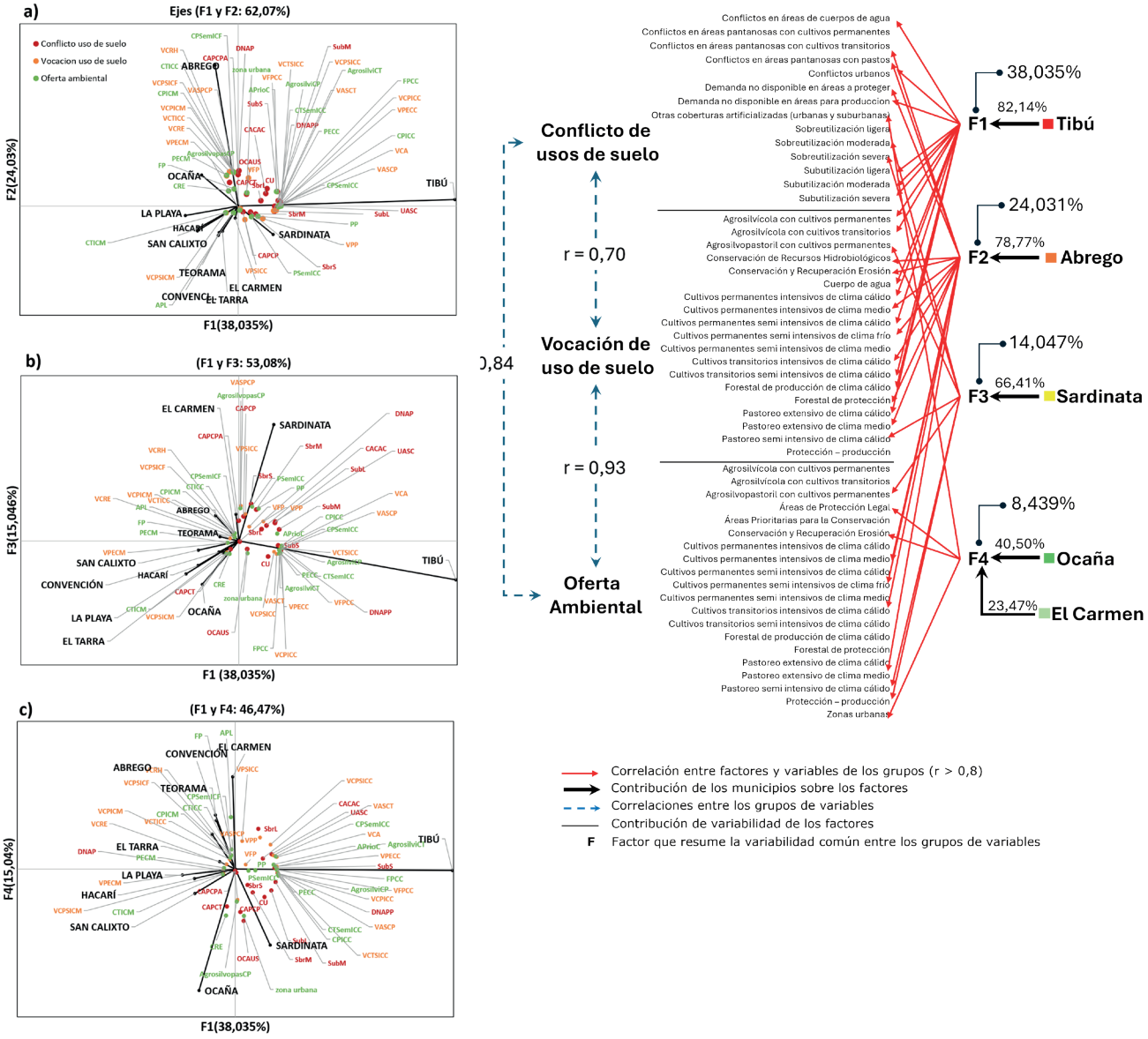


Figura 3. Correlaciones entre los grupos de variables, contribuciones de municipios en cada factor, correlaciones entre las variables y los factores

Fuente: autores.

Sobre F1, la contribución de variabilidad de los grupos: vocación de usos de suelo, oferta ambiental y conflicto de usos de suelo es de 33,076 %, 35,905 % y 31,018 %, respectivamente.

En este mismo factor, el municipio que más contribuye es Tibú (82,14 %) donde, en gran medida, su inercia se explica en ese factor ($Cos^2\theta$ = 0,962). De este modo, según la oferta ambiental, conforme a los resultados mostrados (Figuras 3 y 5), con respecto a F1, se observa que las variables más emergentes son las referentes a sistemas agrosilvícola para cultivos permanentes y transitorios, áreas prioritarias de conservación y cultivos permanentes intensivos y semintensivos para climas cálidos, que abarcan un área de 636772,88 ha y dentro de ello Tibú abarca 205480,08 ha (Figura 5a) donde, en el AFM Tibú mostró una puntuación factorial de 4,96 pero contrapuesta a los demás municipios, cuya puntuación fue negativa y muy baja con valores que oscilan entre 0,06 y -1,25, a excepción de Sardinata, cuya puntuación fue positiva pero baja. Estos resultados son muy dicientes de la diferencia de aportes ambientales del municipio de Tibú con los demás municipios, y una de las causas de esta discrepancia es la naturaleza de los pisos térmicos que en consecuencia se reflejan contrastes en la productividad, la oferta ambiental, la economía, lo social y específicamente en el conflicto de uso de suelo, tal como lo demuestra la figura 2a. Así mismo se resalta que, lo que más ofrece ambientalmente este municipio son áreas prioritarias para conservación, seguidas de cultivos permanentes intensivos de clima cálido y de sistema agrosilvícola con cultivos permanentes.

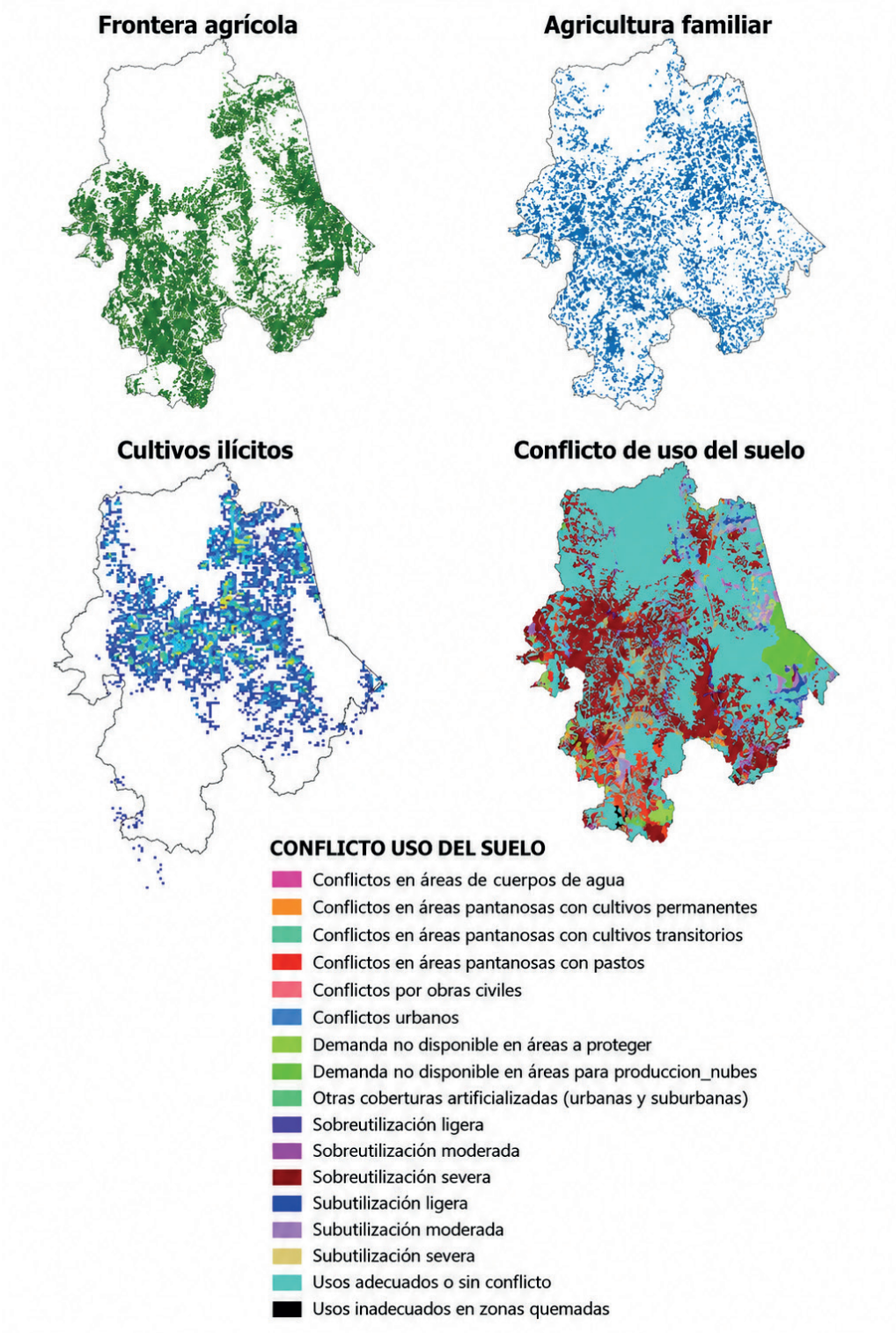


Figura 4. Frontera agrícola, unidad agrícola familiar, cultivos ilícitos y conflictos de uso de suelo

Fuente: UPRA, UNDOC, IGAC.

Tal como se muestra en la figura 3, en lo referente a la vocación de uso del suelo, se demuestra que F1 está fuertemente correlacionado con las variables VASCP, VASCT, VCA, VCPSICC, VCTSICC, VFPCC, que en conjunto ocupan un área de 164517,145 ha del Catatumbo. Igualmente, la figura 5b muestra cómo el municipio de Tibú es el que más contribuye significativamente sobre el respectivo factor. Acerca de las variables mencionadas, Tibú abarca 128513,26 ha. Campos Naranjo & Forero-Cantor (2023) resaltan cómo el sistema agrosilvícola en Tibú ha sido clave diversos procesos productivos, al respecto, el autor destaca cómo este tipo de aprovechamiento, aplicado en la producción de palma, ha permitido ejemplificar la diversificación agrícola como alternativa sostenible en cuanto lo económico, lo social y ambiental del municipio. Seguidamente, es importante resaltar que, sobre Tibú, el agua es un punto de apoyo clave para la producción agropecuaria, acuicultura, conservación de la biodiversidad, desarrollo urbano, entre otros. De acuerdo con Albornoz et al. (2025) y Naranjo-Merino et al. (2017), los cuerpos de agua en Tibú tienen una relación importante en el desarrollo agrícola con diferentes tipos de cultivos, como fuente directa para el riego, como también para el equilibrio ambiental y resiliencia del territorio. En cuanto a los cultivos transitorios y permanentes semintensivos de clima cálido, Tibú demuestra ser el territorio con mayor extensión, con 39854,40 y 8221,34 ha, respectivamente. Para dichas condiciones, se observa que esta jurisdicción puede implementar prácticas agrícolas aplicando técnicas intermedias entre la agricultura extensiva y la intensiva para cultivos de corta y larga duración. Según Escobar et al. (2020) y Charry Camacho y Vélez Betancourt, (2021), estas circunstancias del entorno permiten integrar cultivos transitorios, como el maíz y el fríjol, con cultivos permanentes, como el cacao y frutales, lo que en consecuencia permite maximizar la productividad, el uso del suelo y la adaptación de los sistemas agrícolas al clima cambiante.

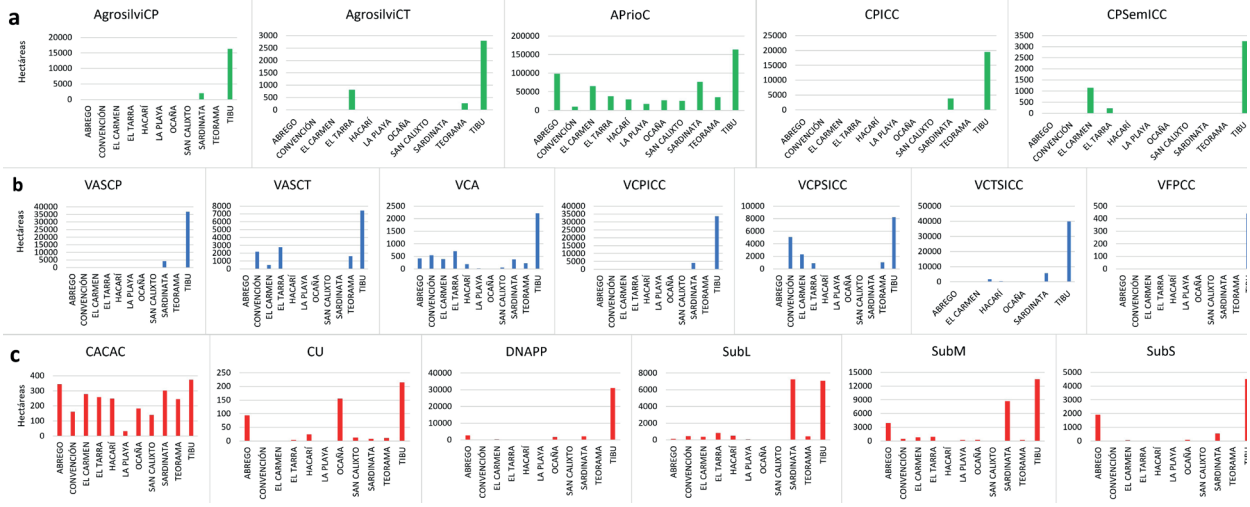


Figura 5. Factor 1. Variables relevantes en los municipios del Catatumbo. Oferta ambiental, vocación y conflicto de uso de suelo.

Fuente: IGAC (s. f.).

A nivel general, en este análisis se encontró que el área total de vocación no excede el total de la oferta ambiental; no obstante, por diversas situaciones, la vocación del suelo puede exceder los límites (Alvarado-Quiroa y Araya-Rodriguez, 2014), lo cual genera múltiples problemas (Martínez-Valderrama et al., 2021). Mencionado lo anterior, se evidencia que en F1 sí existen áreas que están presentando conflicto de uso de suelo, y que en efecto se hace necesario explicar, especialmente, las variables que explican los factores escogidos en el AFM. De esta manera, en F1, conforme a la figura 3, se resaltan las áreas con conflictos CACAC, CU, DNAPP, SubL, SubM, SubS. Estos espacios en conjunto alcanzan un área de 94025,75143 (Figura 5c), lo cual comprende el 17,77 %. del área total de conflicto y sobre ello Tibú abarca 56629,55138 ha.

Sumado a lo anterior se encontró que, en Tibú (Figuras 5a y 5b), la vocación de uso del suelo en áreas referentes al sistema agrosilvícola para cultivos permanentes y transitorios excede la oferta ambiental en 20468,50 ha y 4634,13 ha, respectivamente, y esto en efecto esto estaría inmerso en los conflictos de uso del suelo, lo cual abarca un total de 93200,81129 ha. Al respeto, las variables que mejor explican F1 ($\cos^2\theta > 0{,}68$) son la subutilización ligera, media y severa, como también demanda no disponible en áreas para producción (DNAPP), como lo corrobora la figura 4c, que describe una superficie de 56041,55127 ha para Tibú. Esto significa que las actividades de uso del suelo en ese municipio no son compatibles con las características naturales y ambientales del suelo, lo que, en consecuencia, está conllevando a la degradación del suelo, alteraciones ambientales y baja productividad. Así mismo, si bien la sobreutilización severa en este municipio tiene una inercia baja en F1 ($\cos^2\theta>0{,}076$), sí es necesario resaltar que, en extensión (27303,84743ha), este tipo de conflicto es el más relevante en su territorio.

Para darle explicación a las causas del conflicto mencionado, Maharjan et al. (2023) y Gao et al. (2022) afirman que estos conflictos se deben a una inadecuada gestión de la tierra, mano de obra ineficiente y prácticas de producción deficientes, dadas por pequeños, medianos y grandes productores agropecuarios. Según la Presidencia de la República de Colombia (2025), en el Catatumbo, la unidad de agrícola familiar (UAF) oscila entre 10 y 25 ha; sobre esto se tienen en cuenta las actividades agrícolas, forestales y pecuarias. En Tibú, en los productores, a nivel de UAF, se destaca la producción de cacao, palma de aceite, cultivos de pancoger, como yuca, plátano y maíz, y ganadería bovina. No obstante, de acuerdo con la tabla 7, se observa que sobre este tipo de actividades se identifica una serie de conflictos de uso del suelo en el respectivo municipio, resaltando la sobreutilización severa sobre los demás conflictos, seguido de la subutilización del suelo, siendo esto último más relevante para Tibú que para las demás regiones del Catatumbo. En cuanto a la producción de palma, ha provocado la subutilización de la capacidad productiva de los suelos (Romero Rubio, 2021). Según la Cámara de Comercio de Cúcuta (2021), en este municipio se han alcanzado las 33.000 ha de este tipo de cultivos.

Según informes de la FAO, la Agencia de Desarrollo Rural (2021) y Báez Sandoval et

al. (2023), la ganadería extensiva en Tibú constituye una de las principales causas de los conflictos de uso de suelo. El censo pecuario realizado por el ICA (2024) reporta la existencia de 805 fincas ganaderas en el municipio, albergando un total de 33.140 bovinos. Esta actividad, bajo el modelo extensivo, requiere aproximadamente 49.000 ha para su sostenimiento, según las estimaciones de carga animal por hectárea (Fedegán, 2015).

Tabla 7.

Conflictos de uso de suelo sobre actividades agropecuarias a nivel de UAF

Municipios	CACAC	CAPCP	CAPCT	CAPCPA	CU	DNAP	DNAPP	OCAUS	SbrL	SbrM	SbrS	SubL	SubM	SubS	UASC	Total
ABREGO	49,0	786,6	35,6	6613,2	59,3	1644,0	508,2	3,1	424,8	247,9	5648,0	38,5	3166,1	1420,5	13574,8	34471,1
COVENCION	3,5	42,4		0,5				0,9	201,7	419,5	12594,0	151,7	190,3		4999,9	18604,6
EL CARMEN	0,4	97,1	16,2	1668,4		299,7	25,0	2,2	441,4	323,6	15830,4	167,1	249,0	0,1	13134,7	32255,4
El TARRA	85,3	84,7		147,7				4,5	2,0	863,5	8950,3	280,4	80,2		12770,0	23268,5
HACARÍ	125,5	1549,5		116,2				1,3	24,2	73,2	6951,1	325,7	53,7	1,8	6036,4	15258,6
LA PLAYA	2,4	1904,3		471,0		11,3		0,5	341,0	20,5	2100,7		117,3	4,9	4514,5	9499,2
OCAÑA	88,9	339,5	82,7	1053,0	7,5	450,6	448,3	8,7	12,6	27,3	7119,1	11,1	120,9	36,9	5647,3	15454,1
SAN CALIXTO	42,2	1873,5		522,9	1,6			1,6		382,9	5575,0	9,8	24,9		6177,1	14611,5
SARDINATA	54,8	3411,0		2931,8		0,3	374,8	2,2	266,2	1545,2	36950,0	1725,7	2064,1	170,6	24472,5	73969,0
TEORAMA	55,3	400,6		188,6		48,5		1,2	308,5	27,3	11751,1	137,0	106,7		8101,3	21126,0
TIBÚ	100,9	551,1		532,9	18,5	229,7	5046,4	4,3	244,2	617,7	10383,1	1972,3	3696,5	773,3	46932,7	71103,6
Total	608,0	11040,4	134,5	14246,1	86,9	2684,0	6402,7	30,4	2266,6	4548,5	123852,8	4819,5	9869,8	2408,0	146361,1	329621,6

Tabulación: autores.

Fuente: UPRA, IGAC (s. f.).

Tabla 8.

Cultivos ilícitos en los diferentes tipos de conflictos de uso del suelo

Municipios	CACAC	CAPCP	CAPCPA	DNAP	DNAPP	OCAUS	SbrL	SbrM	SbrS	SubL	SubM	SubS	UASC	Total (Ha)
ABREGO								0	68		0		25	93
COVENCION	5	11					27	14	893	38	42		875	1905
EL CARMEN			1		1		14		393	0			411	820
El TARRA	18	30	56			1		356	2522	50	44		3304	6381
HACARÍ	2	40	6					1	198	3			326	576
LA PLAYA		0	0						16				11	27
OCAÑA		1	5	2					1				8	17
SAN CALIXTO	1	53	7					22	364		6		509	962
SARDINATA	14	252	264		26		12	198	3792	114	32	4	4746	9454
TEORAMA	32	98	34	16			26		1843		20		1694	3763
TIBÚ	4	228	188	1	165		86	174	4085	461	950	210	15370	21922
Total	76	713	561	19	192	1	165	765	14175	666	1094	214	27279	45920

Tabulación: autores.

Fuente: UNODC, 2022.

Además de lo explicado, Tibú enfrenta retos sociales y de orden público que agravan el uso inapropiado del suelo, como el despojo de tierras y su ocupación por grupos armados ilegales (Uribe Kaffure, 2013). En este contexto, el municipio lidera el área de cultivos de coca con 21.922 ha, lo que representa el 8,1 % de su superficie y el 0,91 % del área total del departamento (UNODC, 2023), actuando como una actividad productiva que intensifica el conflicto de uso de suelo y compite con los usos agropecuarios

permitidos. De acuerdo con la tabla 8, el valor más relevante (15370 ha) en expansión de cultivos ilícitos se presenta en áreas que oficialmente son reconocidas sin conflicto, seguido de áreas donde se evidencia la sobreutilización severa, con 4085 ha.

Por otra parte, la tabla 4 muestra otros conflictos de uso, entre ellos los conflictos urbanos (214,81 ha) y disputas en zonas de cuerpos de agua (373,19 ha), evidenciando la complejidad del panorama territorial. Adicionalmente, de acuerdo con lo explicado por Borda et al. (2024), las áreas de conservación del municipio de Tibú son lugares que significativamente son impactados por el conflicto social donde se hace necesaria una relevante gobernanza, especialmente el agua y la participación comunitaria.

De acuerdo con lo mencionado, el F1 representa municipios con una oferta ambiental enfocada a la vocación productiva de cultivos permanentes y transitorios, específicamente para climas cálidos con enfoques pecuarios y conservacionistas, acompañados de la distorsión derivada de la subutilización, sobreutilización del suelo y usos no permitidos.

El F2, en su mayor influencia, representa municipios conservacionistas con una oferta ambiental factible para una producción agrícola y forestal de clima medio y frio con producción pecuaria apoyada de pastoreo extensivo con enfoque de protección del recurso hídrico y arbóreo, pero acompañados de conflicto de usos del suelo referentes a usos no permitidos y conflictos en áreas pantanosas con pastos. En lo concerniente, la contribución de variabilidad de los grupos vocación de usos de suelo, oferta ambiental y conflicto de usos de suelo es de 41.57%, 31.56% y 26.86%, siendo la vocación del uso de suelo el que más peso muestra respectivamente. En este factor, el municipio que mayor contribuye es Ábrego (82,14 %), cuya inercia está muy bien explicada en ese factor ($Cos^2\theta$=0,932). De esto modo, en la oferta ambiental, las variables que mejor explican F2 son AgrosilviCP, AgrosilviCT, APrioC, CPICC, CPSemICC, CTSemICC, FPCC, PECC. Sobre esto se encontró que, los cosenos cuadrados ($Cos^2\theta$) de las variables mostraron $Cos^2\theta > 0,8$, inclusive para las variables AgrosilviCP, AgrosilviCT, CPICC, FPCC y PECC, cuyos valores en magnitud son cero. Según Escofier y Pagès (1994), esto ocurre porque los cosenos cuadrados no siempre dependen directamente de los valores de las variables, sino de la calidad de explicación en los ejes factoriales, es decir, estas variables con valores nulos tienen un $Cos^2\theta$ elevado, debido a que presentan correlaciones con otras variables que igualmente están alineadas significativamente con otro factor. Mencionado esto, si bien las variables con valores nulos brindan un apoyo importante en el AFM, lo siguiente solo dará explicación a las demás variables. De este modo, en Ábrego, la superficie de cobertura de las variables mencionadas es de 5443,16 ha y, así mismo, cada una de estas respectivas variables son superiores en superficie, en comparación con los demás municipios (Figura 6a). Con respecto a la puntuación factorial obtenida en el AFM, se observa que Ábrego alcanza un valor positivo de 3,86 pero muy contrario al valor de los demás municipios, cuya puntuación fue

negativa, a excepción de Ocaña y Tibú (0,845 y 0,180). Esto nos indica que este municipio tiene también diferencias muy marcadas con los demás municipios, debido a sus condiciones topográficas y altimétricas.

En cuanto a la vocación del uso del suelo, en F2 se subrayan siete variables Tabla 7. (Figura 6b) que abarcan un total 299964,9214 ha, y sobre esto Ábrego cubre 111621,4693 ha, y de estas variables, las que mayor superficie tiene son las VCRE y VFP, es decir, que sobre este municipio se prioriza conservación y recuperación de suelos, prioritariamente en lo referente a la erosión, lo cual implica actividades para reducir la pérdida de suelo, mejorar su capacidad productiva y tener protección forestal sobre áreas vulnerables.

Acerca del conflicto de uso del suelo (Figura 6c), en F2 se resaltan tres variables: CAPCPA y DNAP, ocupando en el municipio de Ábrego 33890,8 ha, siendo las más representativas para este municipio las áreas pantanosas con pastos (CAPCPA) y demanda no disponible en áreas que se van a proteger (DNAP), con 27500,839 ha y 6389,960 ha, respectivamente. Esto refleja un uso inadecuado del suelo, principalmente por actividades agrícolas y pecuarias. En este municipio, el más alto rendimiento se da con la producción de cebolla y, en pequeñas extensiones, plátano, café, caña, yuca, fríjol y hortalizas, en conjunto con la ganadería bovina de doble propósito, porcinos y producción avícola para el autoconsumo. De ello se debe tener en cuenta que las AUF ocupan un total de 34471.1 ha, de las cuales 20896.3 ha presentan conflicto de uso del suelo y, según la tabla 7, 6613.2 y 1644 ha están dentro de los conflictos mencionados, respectivamente. Sobre ello, se sabe que, según el ICA (2024), el municipio alberga 17.099 bovinos en 939 fincas, ocupando cerca de 25.000 ha que, en consecuencia, podrían estar provocando este tipo de conflictos, además de 93 ha de cultivos ilícitos como lo muestra la tabla 8.

Es importante tener presente que las áreas pantanosas son superficies que en gran medida pertenecen a la ribera del río Algodonal donde, en efecto, se da la oportunidad de generar inundaciones y condiciones oportunas para crecimientos de pastos adecuados para la producción bovina.

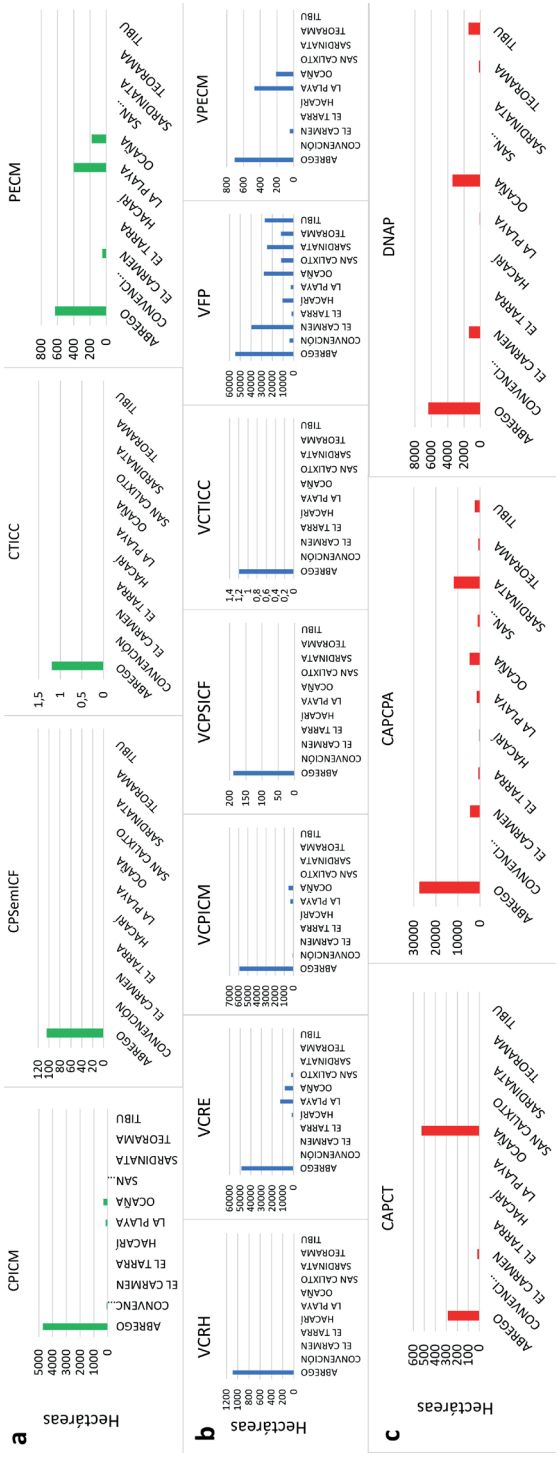


Figura 6. Factor 2. Variables relevantes en los municipios del Catatumbo. Oferta ambiental, vocación y conflicto de uso del suelo.

Fuente: IGAC (s. f.).

El F3 representa municipios con mayor conflicto por sobreutilización, especialmente sobre suelos cuya vocación está dada para una producción integral de árboles, cultivos permanentes y ganado con semipastoreo para clima cálido. De acuerdo con esto, la contribución de los grupos de vocación de usos del suelo, oferta ambiental y conflicto de usos del suelo es de 23,829 %, 32,258 % y 43,913 %, respectivamente. En este factor, el municipio de Sardinata es el que más contribuye (66,41 %) con un $\cos^2\theta=0,77$, lo cual explica que el 77 % de inercia está representado en este factor. En la oferta de este factor se resaltan las variables AgrosilvopasCP, PSemiCC y PP, ocupando un área de 238052,238 ha. En lo referente a la oferta ambiental (Figura 7a), sobre este municipio las variables mencionadas ocupan un área de 59432,6414 ha. Los demás municipios oscilan entre 14.000 y 28.000 ha. En el AFM, la puntuación factorial de este municipio en este factor es positiva y mayor (2,81) en comparación con los demás municipios, lo cuales representan una puntuación negativa a diferencia de Ábrego, El Carmen y Teorama. En este factor, los municipios de Ábrego y Teorama presentan una puntuación baja positiva (0,61, 0,64 y 0,1), lo cual indica que presentan un grado de similitud baja. En cuanto a la vocación de uso del suelo, las variables más relevantes son VASPCP y VPSICC, con un área de 15960,51 ha (Figura 7b). Para estas variables, Sardinata abarca 6430,10 ha. No obstante, la principal problemática es la sobreutilización media, con 6.755,2 ha, y la sobreutilización severa, con 106.298,46 ha (Figura 7c). Esta última es la más relevante del Catatumbo.

En las UAF y grandes productores, en el municipio de Sardinata se dan cultivos de plátano, palma de aceite, café, caña, cacao, panela, yuca, maíz, arroz, mandarina y tomate, tan. Y desde la parte pecuaria se da la ganadería bovina extensiva de doble propósito y especies menores. Puntualmente, de ello se sabe que, con respecto al cultivo de palma, entre Sardinata y Tibú abarcan 42,674 ha, representando el 83,5 % del área de producción de Norte de Santander, distribuida especialmente en pequeños productores. Con base en la tabla 7, podemos observar que Sardinata es el municipio que mayor conflicto de uso del suelo provoca, mostrando 139943,239 ha de forma genera las cuales 73969 ha pertenecen a agricultura familiar, siendo lo más relevante la sobreutilización severa del suelo, con 36950 ha para UAF y 69348,4636 para los demás tipos de actividades. A esto se le adiciona la expansión de cultivos ilícitos, con 9464 ha, cuya implementación provoca diferentes tipos de conflictos de uso del suelo (Tabla 8) donde impacto más lo relevante es la sobreutilización severa y en las zonas que oficialmente son reconocidas como lugares con usos adecuados.

Por otro lado, existe la ganadería extensiva, lo cual mayor impacto relevante, como lo muestra el IGAC (s. f.). Además de lo mencionado, factores como la minería ilegal y los conflictos armados incrementan la pérdida de biodiversidad y contribuyen al cambio climático (Ayala et al., 2019). A esto se suma la contaminación de fuentes hídricas por actividades mineras y agroindustriales, con presencia de metales pesados en ríos de zonas mineras (Paredes-Vilca et al., 2024).

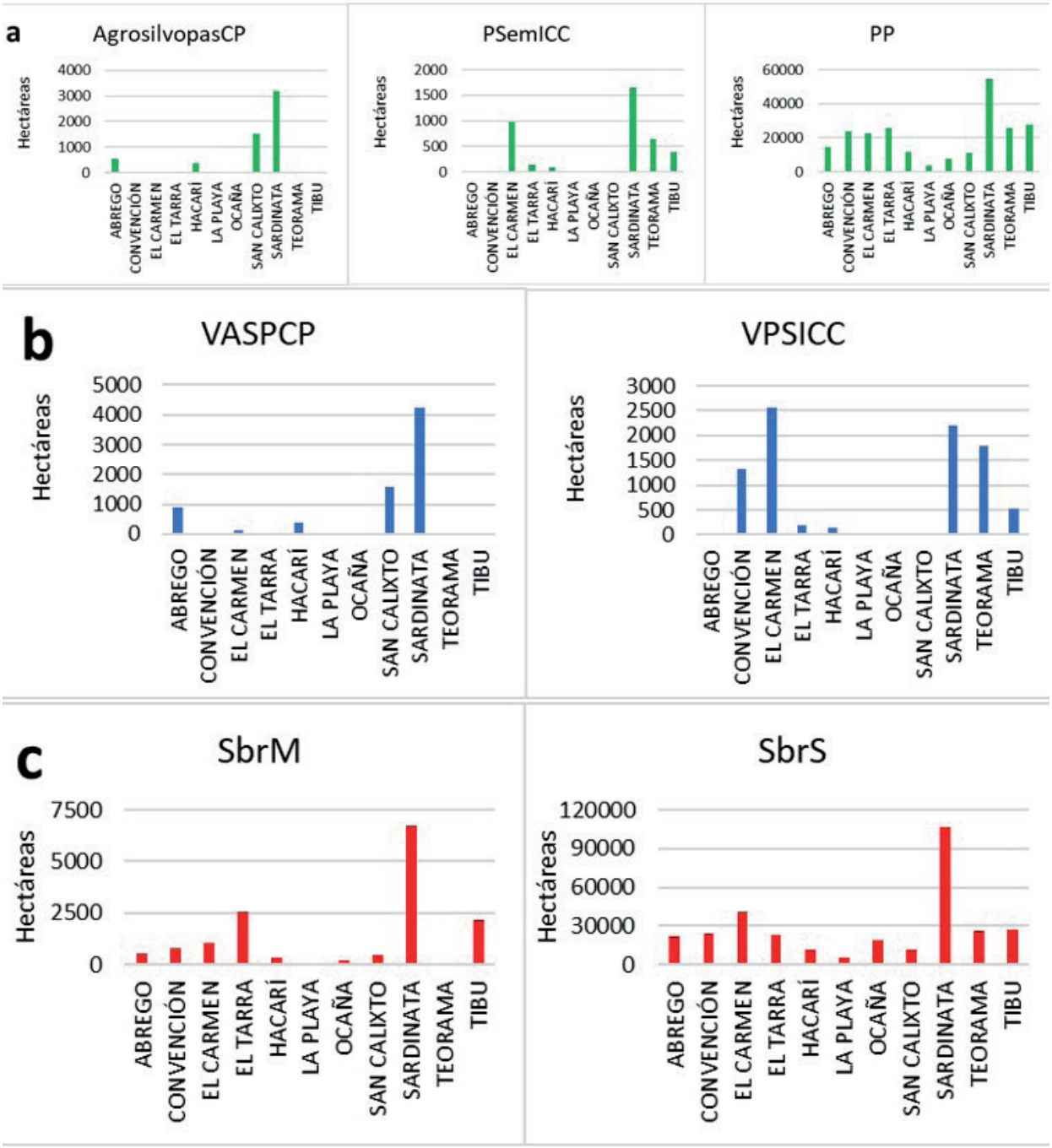


Figura 7. Factor 3. Variables relevantes en los municipios del Catatumbo. Oferta ambiental, vocación y conflicto de uso del suelo.

Fuente: IGAC (s. f.).

En el factor 4 (F4) encontramos dos situaciones bien marcadas por los municipios de Ocaña y El Carmen, con la inercia más alta en el respectivo factor, con $Cos^2\theta$ de 0,374 y 0,377 y puntuación factorial contraria, -1,64 y 1.251, respectivamente. Al respecto, Oca-

ña esto es debido, principalmente al conflicto de uso de suelo referente a coberturas urbanas y suburbanas (OCAUS). En lo concerniente a esta jurisdicción, este problema abarca 672.31 ha, superando sustancialmente a los demás municipios de Catatumbo, donde siete de ellos oscilan entre 9 ha y 68 ha y los otros tres entre 140 y 250 ha. Sobre F4, este problema muestra r = -0,698 y una contribución de 12,76 %. El valor negativo resalta cómo el aumento de la expansión urbana de este municipio influye de forma contraria sobre las demás variables que componen al respectivo factor, especialmente sobre áreas de vocación natural y de conservación ambiental, entre otros. Según Álvarez Prada et al. (2018), la expansión demográfica urbana de Ocaña se caracteriza por tener deficiente planificación lo que en efecto da la oportunidad de desencadenar diversos problemas de índole social. Según Surya et al. (2021) y Ren et al. (2022), estas conductas influyen de forma adversa sobre la disposición ambiental y la calidad del hábitat de zonas cercanas a centros urbanos.

Por otro lado, en Ocaña también se resalta el conflicto de uso del suelo relacionada con CAPCP con 1848,45 ha, índice de correlación con F4 r = -0,577 con una contribución de 8,71 % y un CAPCT con 524,86 ha, r = -0,503 y una contribución de 6.62 % sobre F4. En este último, Ocaña es el más representativo del Catatumbo, seguido de Ábrego (285 ha) y El Carmen (16 ha), los demás municipios no presentan este tipo de conflictos. Al respecto, en Ocaña existen áreas pantanosas mancomunadas a los ríos y cuencas hidrográficas. En la Reserva Forestal Cuenca Hidrográfica del Río Tejo existen zonas protegidas que contienen estos humedales, como también parte de la cuenca del río Algodonal y otras quebradas que igualmente exteriorizan zonas pantanosas. Al respecto, Díaz (2020) determina que en Ocaña esta situación se presenta debido a la elevada presión agrícola y falta de gestión afectiva.

El Carmen, en segundo lugar, contribuye en un 23,47 % sobre el F4, si bien se sabe que en este factor el municipio ocupa el segundo puesto referente a la sobreutilización severa (40764.38 ha), el índice de correlación (r) de esta variable con el respectivo factor es muy baja e inversa (-0,213), con una contribución del 1.187 % lo cual demuestra que, otros municipios del Catatumbo tienen mayor relevancia en este aspecto y que, de forma local, esta jurisdicción aporta otras condiciones que mayormente contribuyen a F4. En cuanto a la vocación de uso del suelo, El Carmen es el municipio del Catatumbo con mayor relevancia en cuanto a áreas de protección-producción, representado en una extensión de 127164,03 ha, r = 0,428 y contribución de 3,6%; no obstante, presenta una inercia muy baja ($Cos^2\theta = 0,183$). Si bien es relevante la expansión de protección en el Catatumbo, esto explica que El Carmen no es tan homogéneo, lo que por consecuencia se necesita un análisis más detallado del territorio. No obstante, en la oferta ambiental es la zona que más área de protección legal dispone, descrita con un valor de 65897,3154 ha, r = 0,798 y una contribución sobre F4 de 10,52 % y un $Cos^2\theta = 0,5$. En consecuencia, estos resultados posicionan al municipio como un territorio clave por su relevante área de protección legal y su vocación mixta

de conservación y producción, lo cual aporta significativamente a la variabilidad de este factor, con una representación moderada en el AFM.

En los demás municipios se observa $\cos^2 \theta < 0{,}41$ para casi todos los factores (F1, F10), lo cual indica que tienen baja capacidad de representación en una sola dimensión. De ello también se observa que estos territorios tienen una contribución relevante sobre alguno de los factores, pero a su vez sobre estos factores se presenta una inercia baja, esto en consecuencia es propio de un caso particular, donde su dinámica es notable para su descripción, pero no incluye significativamente sobre el territorio general del Catatumbo, debido a que no sigue un patrón dominante.

Sobre el particular, se encuentra el municipio del Tarra cuyo perfil factorial se explica en los factores 2, 6 y 9 con $\cos^2\theta < 0{,}4$, lo cual indica que no sigue patrones generales del Catatumbo. Para este municipio se resalta la vocación del suelo, la cual alcanza 70319,1395 ha; el conflicto de uso de suelo, de 28627,35866 ha; una frontera agrícola de 30342,6283 ha, y 6381 ha de cultivos ilícitos. Para el caso del municipio de Convención, igualmente se presenta un perfil factorial mixto distribuido entre F1 y F10 con $\cos^2\theta < 0{,}28$. En este territorio se observa que a plenitud se aprovecha la frontera agrícola; no obstante, 171,2924 ha están fuera de los límites, como lo describe la figura 4. El área que describe la vocación cuenta con 93107,1261 ha. En cuanto a conflicto de uso del suelo se describen 26701,75131 ha y dentro de ello 1905 ha dedicadas a cultivos ilícitos. Sobre ello el tipo de conflicto más relevante es la sobreutilización del suelo. Igualmente, se resalta que para este territorio se cuenta con 58737,1235 ha de protección legal. Para el caso de Teorama, se presenta una distribución factorial de inercia semejante a Convención, con $\cos^2\theta < 0{,}33$. En este municipio se presenta un área de vocación de uso del suelo de 92663,01568 ha, dispone de 29908,54259 ha de protección legal y presenta una frontera agrícola de 15820,01233, un área de UAF de 21213,44282, excediendo en 5393,430 ha los límites de la respectiva frontera. En cuanto a los conflictos de uso de suelo, este describe un área de 30549,00 ha y dentro de ello el conflicto más relevante es la sobreutilización del suelo, con 26645,45768 ha. Dentro del conflicto de uso del suelo se muestran 3763 ha de cultivos ilícitos, siendo, igualmente, la sobreutilización severa lo más predominante, con 1843 ha en ello.

Hacarí describe una distribución de inercia entre los factores F1 y F9 con $\cos^2\theta < 0{,}245$. El área total de vocación de uso del suelo es de 41878,2121 ha. La variable de vocación que mayor correlación presenta con F7 son cultivos permanentes semintensivos. El cultivo más predominante en esta región es el café, seguido de cultivos de pancoger de yuca, maíz y plátano. Igualmente, para la economía familiar se tiene el cacao, la panela y el cacao. De esta manera, la frontera agrícola comprende un área de 16933,89271 ha, y un área total de UAF de 15281,38215 ha, el área de conflicto de suelo equivale a 15730,2673 ha y el más relevante es la sobreutilización severa, con 26157,6331 ha, y sobre este 198 ha pertenecen a cultivos ilícitos. Para el caso de San Calixto se describe la mayor distribución de inercia en F1 con $\cos^2\theta = 0{,}360$,

pero su mayor contribución se da en F8 (65,54 %). La superficie de vocación de uso de suelo corresponde a 39762,8401 ha; la variable que presenta mayor correlación con F8 es área forestal de protección 27915,8068 ha, es decir, que el suelo no debe usarse para ganadería o agricultura sino para conservar y recuperar el bosque natural. Sobre este municipio, el cultivo agrícola más relevante es el café, seguido del aguacate, la caña panelera y el cacao y cultivos de pancoger, maíz, yuca, fríjol, cebolla y tomate. La producción pecuaria relevante es el ganado bovino de doble propósito adaptado a terrenos de ladera, como también porcinos y especies menores. Su frontera agrícola alcanza las 15570,365 ha, y el área total UAF, 14546,08145 ha. El conflicto de uso de suelo presenta un área de 17144,24467, donde 8434,5 ha se dan en al UAF y dentro de ello 962 ha pertenecen a cultivos ilícitos. El conflicto más relevante es la sobreutilización severa, con 11575,00 ha, y sobre ello 5475 ha se dan en la UAF y 364 ha en cultivos ilícitos.

El municipio de La Playa describe la mayor distribución de inercia en F1, con un valor de $\cos^2\theta$= 0,361 y los demás valores distribuidos en el resto de los factores con $\cos^2\theta$ < 0,203. Los factores que más contribuyen son F7, F6 y F5, con porcentajes de 29,269 %, 24,44 % y 14,07 %, pero con baja inercia, respectivamente. El área de vocación de uso del suelo es 12124,62053 por extensión la vocación más relevante es conservación y recuperación erosión (VCRE) con 12485,1233 ha. En este municipio predomina el cultivo de cebolla, café, tomate, fríjol y maíz. En lo pecuario se resalta la producción bovina extensiva, porcinos, aves de corral y caprinos. El municipio presenta un área de 15865,07601 ha y un área total UAF de 9493,260471 ha. El área total de conflicto de uso del suelo alcanza 12124,62053 ha. Dentro de ello, la UAF abarca un área total de 9499.2 ha y así mismo dentro de este ,27 ha pertenecen a cultivos ilícitos. En cada uno de estos, el tipo de conflicto más relevante es la sobreutilización severa.

La grafica 8 describe la inercia baja que tienen los municipios que no se representan entre los factores 1 y 4, lo cual da a entender que su perfil territorial no se adapta a las dimensiones dominantes y sus características territoriales no presentan un mismo comportamiento, evidenciando en efecto de particularidades locales, lo que permite constatar la relevante diversidad en el Catatumbo.

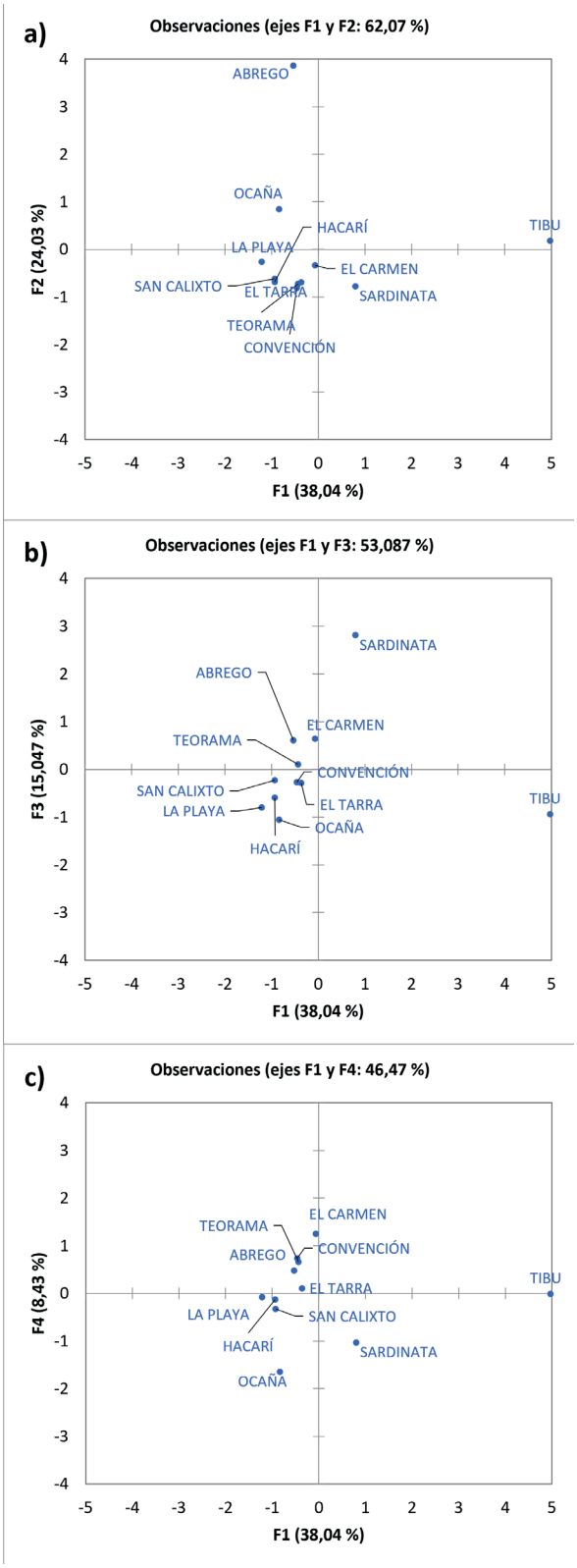


Figura 8. Distribución de las variables en los factores 1, 2, 3 y 4

Fuente: autores.

Las gráficas muestran el comportamiento de los municipios en distintos planos factoriales:(a) Plano F1 y F2, lo cual concentra la mayor inercia y varianza explicada (62,07 %), aglomerando las características territoriales dominantes. (b) Plano F1 y F3 (53,087 % de varianza acumulada), muestra comportamientos intermedios en la dispersión de los municipios. (c) Plano F1 y F4 (46,47 % de varianza acumulada), en el cual es relevante la baja inercia de los municipios que no se destacan en las dimensiones dominantes, demostrando así las características locales y la notable diversidad del Catatumbo.

Matriz de correlaciones entre los factores

La tabla 9 nos indica que entre los factores existen correlaciones inversas, es decir, las variables de los grupos (oferta ambiental, vocación y conflicto de uso del suelo) muestran un comportamiento inverso moderado, demostrando que mientras las áreas intervenidas, ya sea por recuperación o degradación, aumentan, es muy probable que en otras jurisdicciones presenten lo contrario. Así mismo, esta reciprocidad es también consecuencia de las variaciones topográficas de la zona del Catatumbo.

Tabla 9.

Correlaciones entre factores

Factores	F1	F2	F3	F4
F1	**1**	**-0,577**	-0,260	**-0,365**
F2	**-0,577**	**1**	**-0,275**	-0,174
F3	-0,260	**-0,275**	**1**	0,089
F4	**-0,365**	-0,174	0,089	**1**
Los valores en negrita son diferentes de 0 con un nivel de significación alfa = 0,05.				

Fuente: autores.

Este estudio, a través del AFM, permitió representar y comparar 54 variables agrupadas en un espacio común, lo que facilitó la interpretación y análisis de relaciones entre ellas. Así mismo, aplicando los análisis de sensibilidad mencionados en la metodología, se pudo constatar la robustez del modelo implementado. Con respecto a la sensibilidad de selección de variables, se excluyeron bloques (conflicto, vocación, oferta) y los municipios críticos (Tibú, Sardinata, Ábrego), de ello se observó que, en cualquier escenario, cada uno de estos municipios aparece en los primeros lugares. De igual forma, en los demás análisis de sensibilidad, los municipios críticos mostraron los mismos comportamientos, lo cual constata su relevancia en el Catatumbo, especialmente en la vocación, la conservación y los conflictos relacionados con la subutilización

y la sobreutilización del suelo. Esto a su vez comprueba que, aunque no se hizo comparación con otros modelos multivariados, el AFM implementado fue adecuado para este tipo de estudios.

Por otro lado, la información proporcionada por el IGAC, UNDOC y UPRA fue fundamental, debido a la amplitud de variables consideradas, permitiendo un análisis detallado del Catatumbo. Sin embargo, es importante resaltar que los datos cartográficos utilizados provienen de fotointerpretación, lo cual presenta limitaciones, especialmente para el caso de los cultivos ilícitos. Mediante el entrecruzamiento de datos realizado en este estudio, se constató que, en lo reportado por el IGAC con respecto a áreas con usos adecuados o sin conflicto, pueden existir relevantes extensiones de cultivos ilícitos. De acuerdo con Murillo-Sandoval et al. (2024), Jacobi et al. (2018), Vargas (2004) y Gómez et al. (2019), esto puede ocurrir debido a que estos cultivos, al ser asociados con prácticas de cobertura arbórea u otras prácticas agrícolas, pueden no ser plenamente identificables en imágenes aéreas, lo que introduce posibles errores en la interpretación espacial.

Si bien en este estudio, en la mayor de las instancias, se pudo dar respuesta a la pregunta problema e hipótesis planteada, quedaron vacíos por resolver en lo referente a las áreas ocupadas por los diferentes tipos de prácticas agrícolas y pecuarias, puesto que, si bien se tuvo una información precisa de distribución de los cultivos ilícitos, la otra información manejada no cuenta con una caracterización específica de la distribución espacial de los demás tipos de prácticas agropecuarias; de ello tan solo se sabe el tipo de producción agrícola o pecuaria que se da en los respectivos territorios. Esto, por consiguiente, abre la necesidad de seguir explorando a detalle este tipo de análisis con el apoyo de otras metodologías cartográficas y estadísticas, donde igualmente se incluyan variables relacionadas con procesos económicos y sociales para que, en efecto, se tenga una mejor comprensión de las causas de los diferentes tipos de conflictos presentes en las potencialidades naturales de la región del Catatumbo.

4 CONCLUSIONES

No se puede descartar que los cultivos ilícitos rivalizan las cadenas productivas legales y a su vez potencializan los diferentes tipos de conflictos de uso del suelo en el Catatumbo, especialmente en la sobreutilización severa, no obstante, es necesario reconocer que no todas las zonas del Catatumbo están en su mayor parte impactadas, especialmente por cultivos ilícitos. Al respecto, si bien este tipo de cultivos sostienen a la respectiva población, actividades agropecuarias de gran extensión, como ganadería, palma, pastos, entre otros, son las que mayor conflicto provocan.

Conforme a los resultados del AFM, es determinante que el Catatumbo lo podemos diferenciar en cuatro dimensiones ordenadas de forma descendente, de acuerdo con

su contribución de variabilidad el respectivo territorio: la primera, representada por municipios, especialmente Tibú, con alta oferta ambiental y tensión entre vocación y conflicto de uso del suelo. La segunda, manifestada por municipios, puntualmente Ábrego, con enfoque conservacionista y conflicto moderado del uso del suelo. La tercera, descrita en municipios con mayor relevancia como Sardinata, con desequilibrio productivo con el uso real y sobreutilización del suelo; y la cuarta dimensión, con municipios de aspecto de vocación productiva conservacionista con conflictos moderados y problemas específicos.

De lo mencionado, es determinante que, más que por el conflicto de uso del suelo (93.200,81ha), Tibú se resalta más que todo por su variabilidad en extensión en vocación de uso de suelo (265.480,39 ha), siendo el municipio de mayor extensión territorial. Por otro lado, es determinante que el municipio de Ábrego se destaca más por su variabilidad en oferta ambiental, vocación, que por conflicto de uso del suelo que, por su extensión, dado que ocupa el tercer lugar en área afectada por conflicto (68.206,11 ha) y vocación (138.037,42 ha). Sardinata, por su parte, más que por su variabilidad, es relevante principalmente por su extensión en conflicto de uso del suelo, liderando esta categoría, con 153.454,88 ha, que supera ligeramente su área de vocación (146.605,55 ha), siendo concluyente que es el municipio con mayor impacto adverso en el Catatumbo. Por otro lado, los municipios de Ocaña y El Carmen se diferencian en sus atributos de representatividad: Ocaña se destaca por su variabilidad en oferta ambiental, vocación y conflicto de uso de suelo, ocupando el quinto lugar en conflicto (32.653,47 ha) y cuarto en vocación (51.580,38 ha). En cambio, El Carmen se caracteriza por su extensión, posicionándose en el cuarto lugar por conflicto de uso de suelo (50.492,94 ha) y segundo en vocación (172.675,08 ha). Los demás municipios describen perfiles multifactoriales cuya vocación tiene aspecto conservacionista de los recursos, acompañados de conflictos relacionados de forma relevante con la sobreutilización del suelo.

La alta correlación entre conflictos de uso del suelo, la oferta ambiental y la vocación ($r > 0,7$) permite concluir que, debido al amplio abanico de oferta de recursos, las zonas con mayor riqueza natural son las más intervenidas por una sobreutilización y subutilización del suelo que, como consecuencia, están provocando un deterioro ambiental y afectando la funcionalidad de los recursos naturales del Catatumbo por actividades agropecuarias como la ganadería extensiva, cultivos ilícitos y la expansión agrícola desordenada.

Es también necesario reconocer la importancia del rol protector de áreas naturales, de los cuales, Municipios como El Carmen (65897,31 ha), Convención (58737,12 ha) y Teorama (29908,54 ha), que cuentan con áreas protegidas y resguardos indígenas, tienden a presentar menor conflictividad, demostrando la importancia de las protecciones legales de conservación para mitigar impactos ambientales y conservar la biodiversidad. Esto, por necesidad, implica fortalecer la planificación territorial que considere la vocación ambiental del suelo, acompañado de instrumentos legales y técnicos para regular el uso del suelo, darle un

manejo razonable a la expansión agrícola y evitar la degradación irreversible.

Es también concluyente que, debido a la complejidad de la zona de estudio, su diversidad topográfica y climática, el Catatumbo requiere de acciones integrales que incluyan monitoreo ambiental, fortalecimiento institucional y la participación y promoción de prácticas agropecuarias sostenibles. Conforme a los hallazgos encontrados se hace necesario fortalecer la institucionalidad con mayor participación local que permita identificar problemas puntuales, acompañados de seguimiento, control y regulación de conflictos, específicamente en la subutilización y sobreutilización severa del suelo. Igualmente, apoyados de estudios como el presente, ajustar el POT que permita una factible zonificación ambiental productiva, donde se priorice la restauración de áreas afectadas por los conflictos mencionados. Así también, de acuerdo con la vocación del suelo, fortalecer la diversidad agrícola con la incorporación de cultivos de mayor valor, como el café, el cacao y frutales, que, en efecto, tendrían mejor impacto en la reducción de cultivos ilícitos. En cuanto a la producción pecuaria, reducir la presión de ganadería extensiva y proyectar en mayor medida la ganadería intensiva con prácticas sostenibles. Igualmente, es necesario articular gestión pública entre municipios con características similares, donde se incorporen centros educativos y de investigación, de tal manera que se fortalezcan las alianzas para una fácil solución de problemas comunes, acompañada de seguimiento y evaluación que visualice avances en la reducción de conflictos.

CONTRIBUCIÓN DE LA AUTORÍA

Autor 1: metodología, investigación, análisis de datos, conceptualización, redacción, borrador original.

Autor 2: investigación, conceptualización, análisis de datos, redacción, revisión y edición.

Autor 3: logística, revisión y edición.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña por el apoyo intelectual de su personal docente y administrativo, especialmente a la Facultad de Ciencias Agrarias y del Ambiente.

FINANCIAMIENTO

No aplica.

USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Se utilizó la IA Perplexity, con la cual se pudieron conocer vacíos de investigación que el presente estudio busca abordar y subsanar. Así mismo se identificaron análisis faltantes que se debían implementar sobre los resultados obtenidos del modelo estadístico análisis factorial múltiple.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

LITERATURA CITADA

Albornoz, A. N., Rojas, S. C., & Santafe, R. A. K. (2025). Rural Women's Leadership Within the Cocoa Production Chain in Tibú, Norte de Santander, Colombia: A Gender Perspective. Agriculture, 15(4), 370.

Alvarado-Quiroa, H. O. y Araya-Rodríguez, F. (2014). Cambios de uso del suelo y crecimiento urbano. Estudio de caso en los municipios conurbados de la Mancomunidad Metrópoli de Los Altos, Quetzaltenango, Guatemala. Tecnología en Marcha, 27(1), 104-113. https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec_marcha/article/view/1701

Álvarez Prada, J., Ascanio Higuera, T. F. y Gallardo Amaya, R. J. (2018). Determinación y análisis de las causas de accidentalidad en la ciudad de Ocaña, Norte de Santander. Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería. file:///C:/Users/PC/Downloads/biteca,+2851-3245-1-PB%20(1).pdf

Ayala, M., H. J., Diaz, M. L. C., … Valencia, N. A. J., & Valladares, Salinas. R. Y. (2019). Identificación y análisis de impactos de la actividad minera y la explotación ilícita de minerales en los ecosistemas del territorio colombiano. Mesa de Trabajo Interinstitucional, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Báez Sandoval, G. M., Mogrovejo Andrade, J. M., & Bastos Osorio, L. M. (2023). Agricultural development as a contribution to the rural economy of Catatumbo, Norte de Santander. Revista Gestión y Desarrollo Libre, 8(15). https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=10086750

Bernal, J., Sudarsky, J., & Riveros, C. (2021). Illicit crop cultivation in Colombia's National Natural Parks: Dynamics, drivers, and policy responses. Journal of Illicit Economies and Development, 3(1), 22-35. https://jied.lse.ac.uk/articles/10.31389/jied.81

Borda, A. I., Gómez, A. F. R., Lozano, A. M. C., Romero, J. P., & Hernández-Umaña, B. A. (2024). Conflict and environmental peace: tensions and relations over water governance in the colombian Catatumbo region. Revista de Gestão Social e Ambiental, 18(11), 1-25, e010069.

Bürgesser, R. E., Nicora, M. G., & Avila, E. E. (2012). Characterization of the lightning activity of "Relámpago del Catatumbo". Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 77, 241-247.

Cámara de Comercio de Cúcuta. (2021). Visión y líneas estratégicas para el Clúster Palma productiva y sostenible de Norte de Santander. https://redclustercolombia.gov.co/storage/initiatives/documents/cluster-palma-norte-de-santander.pdf

Campos Naranjo, J. I., & Forero-Cantor, G. (2023). Socio-technical transition in the palm oil sector: analysis from a multilevel perspective in Colombia's municipality of Tibú. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, *62*(2), e271345.

Castellanos-Mejía, M. C., Herrera, J., Noguera-Urbano, E. A., Parra, E., & Jiménez-Segura, L. F. (2021). Potential distribution in Colombia of the introduced fish *Pangasianodon hypophthalmus* (Siluriformes: Pangasiidae) and implications for endangered native fish. *Revista de Biología Tropical*, *69*(2), 573-587. https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-77442021000200573

Charry Camacho, A. y Vélez Betancourt, A. F. (2021). *Cadenas sostenibles ante un clima cambiante. El cacao en Colombia*. https://hdl.handle.net/10568/114754

Consejo Nacional de Política Económica y Social. (2013, 15 de enero). Documento CONPES 3739. Estrategia de desarrollo integral de la región del Catatumbo. Departamento Nacional de Planeación.

Departamento Nacional de Planeación [DNP]. (2013). Documento CONPES 3739: Estrategia de Desarrollo Integral de la región del Catatumbo. Consejo Nacional de Política Económica y Social. https://www.minambiente.gov.co/documento-normativa/conpes-3739-de-2013/

Díaz, L. A. (2020). Análisis del cumplimiento del eje ambiental contemplado en el plan de desarrollo "Es la Hora de Ocaña" Municipio de Ocaña - Norte de Santander (2016-2019). [Tesis de Maestría. Universidad Nacional Abierta y a Distancia] https://repository.unad.edu.co/handle/10596/35691

Escobar Carbonari, D., Diaz Marin, N. y Tapasco Alzate, J. (2020). Cadenas sostenibles ante un clima cambiante, Análisis y Recomendaciones. https://cgspace.cgiar.org/items/eea31d7e-e3d2-4256-b1ee-a5320d974221

Escofier, B. y Pagès, J. (1992). *Análisis factoriales simples y múltiples: objetivos, métodos e interpretación*. Servicio Editorial, Universidad del País Vasco

Federación Colombiana de Ganaderos [Fedegán]. (31 de julio, 2015). *Número de vacas por hectárea se duplican en fincas tecnificadas.* https://www.fedegan.org.

co/noticias/numero-de-vacas-por-hectarea-se-duplica-en-fincas-tecnificadas

Fienitz, M., & Siebert, R. (2023). Latent, collaborative, or escalated conflict? Determining causal pathways for land use conflicts. *Land Use Policy*, *134*, 106918. https://ideas.repec.org/a/eee/lauspo/v134y2023ics0264837723003848.html

Gao, J., Cai, Y., Liu, Y., Wen, Q., Marcouiller, D. W., & Chen, J. (2022). Understanding the underutilization of rural housing land in China: A multi-level modeling approach. *Journal of Rural Studies, 89*, 73-81.

Gao, Y., Wang, J., Zhang, M., & Li, S. (2021). Measurement and prediction of land use conflict in an opencast mining area. *Resources Policy*, *71*, 101999. https://ideas.repec.org/a/eee/jrpoli/v71y2021ics0301420721000167.html

Gómez, C. Y., Sastoque, T. G. y Mantilla, S. C. (2019). Los estudios sobre el fenómeno de los cultivos ilícitos de coca en Colombia: una revisión desde los enfoques de la geografía. *Análisis político*, *32*(97), 24-44. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://www.scielo.org.co/pdf/anpol/v32n97/0121-4705-anpol-32-97-24.pdfc

Hjalager, A. M. (2020). Land-use conflicts in coastal tourism and the quest for governance innovations. *Land Use Policy*, *94*, 104566. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0264837719304405

Instituto Colombiano Agropecuario [ICA]. (2024). *Censos Pecuarios Nacional.* https://www.ica.gov.co/areas/pecuaria/servicios/epidemiologia-veterinaria/censos-2016/censo-2018

Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC]. (s. f.). *6,5% de Norte de Santander cuenta con suelos aptos para cultivar.* https://antiguo.igac.gov.co/es/noticias/65-de-norte-de-santander-cuenta-con-suelos-aptos-para-cultivar#:~:text=El%20principal%20problema%20es%20la,territorios%20con%20m%C3%A1s%20suelos%20desaprovechados

Jacobi, J., Lohse, L. y Milz, J. (2018). El cultivo de la hoja de coca en sistemas agroforestales dinámicos en los Yungas de La Paz. *Acta Nova, 8*(4), 604-630.

Ley 2 de 1959 (16 de diciembre). Por la cual se dictan normas sobre economía forestal de la Nación y conservación de recursos naturales renovables.

Maharjan, K. L., Singh, M., & Gonzalvo, C. M. (2023). Drivers of environmental conservation agriculture and women farmer empowerment in Namobuddha municipality, Nepal. *Journal of Agriculture and Food Research, 13*, 100631. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666154323001382

Martínez-Valderrama, J., Ibáñez, J., Gartzia, R. y Alcalá, F. J. (2021). Dinámica de sistemas para comprender los procesos de desertificación. *Ecosistemas*, *30*(3), 2191. https://revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/2191

Moncada Herrera, J. (2007). El Análisis Factorial Múltiple: Un Paso más en la Superación de la Dicotomía Cualitativo-Cuantitatvo. In *VI Congreso Chileno de Antropología*. Colegio de Antropólogos de Chile AG. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.aacademica.org/vi.congreso.chileno.de.antropologia/67.pdf

Murillo-Sandoval, P. J., Sesnie, S. E., Ordoñez Armas, M. E., Magliocca, N. R., Tellman, B., Devine, J. A., Nielsen, E. A. & McSweeney, K. (2024). Central America's agro-ecological suitability for cultivating coca, Erythroxylum spp. *Environmental Research Letters*, *19*(10), 104068. https://www.researchgate.net/publication/384074794_Central_America's_agro- ecological_suitability_for_cultivating_coca_Erythroxylum_spp

Naranjo-Merino, C. A., Ortiz-Rodriguez, O. O., & Villamizar-G, R. A. (2017). Assessing green and blue water footprints in the supply chain of cocoa production: A case study in the Northeast of Colombia. *Sustainability*, *10*(1), 38. https://doi.org/10.3390/su10010038

Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito [UNODC]. (2023, 11 de septiembre). *Colombia desacelera la siembra de coca: tras un aumento del 43 % en 2021, en 2022 fue del 13 %.* https://www.unodc.org/colombia/es/informe-de-monitoreo-de-territorios-con-presencia-de-cultivos-de-coca-2022.html

Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito [UNODC]. (2022, octubre). *Monitoreo de territorios afectados por cultivos ilícitos 2021. https://www.unodc.org/documents/crop-monitoring/Colombia/INFORME_MONITOREO_COL_2021.pdf*

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Agencia de Desarrollo Rural (2021). *Plan integral de desarrollo agropecuario y rural con enfoque territorial. Departamento de Norte de Santander.* https://www.adr.gov.co/wp-content/uploads/2022/03/Toma-1-Norte-de-Santander.pdf

Paredes-Vilca, O. J., Jiménez Díaz, L., Dávila García, J. y Apaza Cruz, J. (2024). Contaminación y pérdida de biodiversidad por actividades mineras y agropecuarias: estado del arte. Revista de Investigaciones Altoandinas, 26(1), 56-66. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2313-29572024000100056

Parques Nacionales Naturales de Colombia. (2023). Parque Nacional Natural Catatumbo Barí.

Peñaranda-Peñaranda, L. P., Hernández-Urbano, G. K., Mogrovejo-Andrade, J. M., Bastos-Osorio, L. M. y Mera-Ramírez, O. A. (2022). El Catatumbo: Análisis de los factores socioeconómicos y su relación con la productividad de la región. *Clío América*, *16*(31), 747-756. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8601246

Presidencia de la República de Colombia. (2025, febrero 3). Gobierno nacional hará uso de la opción de compra de 3.000 hectáreas a proponentes voluntarios en el

Catatumbo. Presidencia de la República de Colombia. https://www.presidencia.gov.co/prensa/Paginas/Gobierno-nacional-hara-uso-de-la-opcion-de-compra-de-3000-hectareas-a-proponentes-voluntarios-en-el-Catatumbo-250203.aspx#:~:text=Asimismo%2C%20indic%C3%B3%20que%20las%20fincas,momentos%20de%20crisis%22%2C%20dijo

Resolución 110 de 2022 (22 de enero). Por la cual se establecen las actividades, requisitos y procedimiento para la sustracción de área de las reservas forestales nacionales y regionales para el desarrollo de actividades consideradas de utilidad pública e interés social y se dictan otras disposiciones.

Romero Rubio, L. C. (2021). Sustitución de cultivos de uso ilícito en Tibú, Norte de Santander. [Tesis de maestría, Universidad de La Salle]. https://ciencia.lasalle.edu.co/server/api/core/bitstreams/05fdce32-7812-4e03-b6cb-282267853a3e/content#:~:text=1.1.1.,-Econom%C3%ADa%20del%20petr%C3%B3leo&text=Tambi%C3%A9n%20se%20dio%20otro%20uso,-generando%20conflictividades%20en%20el%20Catatumbo.

Quintero-Ángel, M., & Ospina-Salazar, D. I. (2022). Agricultural soil degradation in Colombia. In *Impact of Agriculture on Soil Degradation I: Perspectives from Africa, Asia, America and Oceania* (pp. 177-218). Cham: Springer International Publishing.

Ren, Q., He, C., Huang, Q., Shi, P., Zhang, D., & Güneralp, B. (2022). Impacts of urban expansion on natural habitats in global drylands. *Nature Sustainability*, *5*(10), 1-10. https://www.researchgate.net/publication/362243430_Impacts_of_urban_expansion_on_natural_habitats_in_global_drylands

Rincon, O. D. M. (2020). Influence of climate change in the water availability over the eastern side of Colombia [Tesis de doctorado. Technische Universität Dresden]. https://tud.qucosa.de/landing-page/?tx_dlf[id]=https%3A%2F%2Ftud.qucosa.de%2Fapi%2Fqucosa%253A71547%2Fmets

Ríos, J., González, J. C., & García de las Heras, M. (2023). Environment and armed conflict in Colombia: Terrorist attacks against water resources and oil infrastructure in Norte de Santander (2010-2020). *Small Wars & Insurgencies*, *34*(8), 1429-1457. https://ideas.repec.org/a/taf/fswixx/v34y2023i8p1429-1457.html

Surya, B., Salim, A., Hernita, H., Suriani, S., Menne, F., & Rasyidi, E. S. (2021). Land use change, urban agglomeration, and urban sprawl: A sustainable development perspective of Makassar City, Indonesia. *Land*, *10*(6), 556. https://www.mdpi.com/2073-445X/10/6/556

Torres-Alape, J. C., Toro-Martínez, M. K.y Posada-Marín, J. A. (2024). Potenciales conflictos por uso del suelo asociados a la subdivisión predial en el municipio de El Carmen de Viboral. *Revista Politécnica*, *20*(39), 157-170. https://www.redalyc.org/journal/6078/607877254012/html/

Uribe Kaffure, S. (2013). Transformaciones de tenencia y uso de la tierra en zonas

del ámbito rural colombiano afectadas por el conflicto armado. Aproximación desde un estudio de caso. *Estudios Socio-Jurídicos,16*(1), 245-287. https://www.observatoriodetierras.org/wp-content/uploads/2015/08/ART.-URIBE-2014-TRANSFORMACIONES-DE-TENENCIA-Y-USO-DE-LA-TIERRA.pdf

Vargas Manrique, C. E. (2004). Cultivos ilícitos y erradicación forzosa en Colombia. *Cuadernos de Economía*, *23*(41), 109-141. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-47722004000200005

Zou, L., Liu, Y., Wang, J., & Yang, Y. (2021). An analysis of land use conflict potentials based on ecological-production-living function in the southeast coastal area of China. *Ecological Indicators*, *122*, 107297. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1470160X20312395

ANEXOS

Tabla 1.

Áreas (Ha). Conflicto de uso del suelo

Municipios	CACAC	CAPCP	CAPCT	CAPCPA	CU	DNAP	DNAPP	OCAUS	SbrL	SbrM	SbrS	SubL	SubM	SubS	UASC
ABREGO	342,826319	1736,89845	285,893626	27500,8393	93,7932435	6389,96003	2621,49914	142,138969	461,024465	546,111834	22152,2449	112,437613	3914,93219	1905,51017	68716,158
CONVENCIÓN	160,816244	312,4892		22,0818693				59,2043167	325,160917	765,869719	24179,1522	434,794701	442,182098		66387,5936
EL CARMEN	277,180743	165,726219	16,7844696	4469,91358		1381,45616	374,039306	53,8556188	724,465671	1062,73229	40764,3868	366,890678	778,912162	56,6058399	122224,683
EL TARRA	258,334029	226,906864		680,34082	3,5913195			67,7423988	2,5065194	2548,10438	23142,3483	821,97372	875,510325		41759,5232
HACARÍ	247,773513	2781,55226		286,440719	23,6213831			9,4749599	31,2169831	309,863783	11459,6185	487,63718	77,2814592	15,7866072	26157,6331
LA PLAYA	30,6283601	4212,8151		1439,64267	0,8392142	74,1475073	0,2706483	22,9675583	410,986594	90,8327158	5558,6781	78,3856206	198,341553	6,0848943	12070,3947
OCAÑA	182,690444	1848,4508	524,865692	4644,84455	155,084176	3405,24413	1659,52595	672,314461	16,3582456	173,98403	19010,2416	15,1659841	266,777004	77,9275865	19598,2265
SAN CALIXTO	139,599393	3801,51609		1029,17556	12,4759112			29,1766298	0	478,777666	11575,001	28,9904186	49,5320362		22647,772
SARDINATA	302,153017	9105,2026		11855,83	7,822088	3,5304372	2106,82234	172,768901	406,738127	6755,29472	106298,464	7214,27344	8688,41954	537,562869	139943,239
TEORAMA	244,799374	1564,59736		696,909247	11	172,297414	0	18,256511	540,057825	31,5310398	26645,4577	431,145865	203,952349		62131,5431
TIBU	373,19003	2426,30509		2310,51223	214,810076	1429,04949	30944,4281	250,479576	676,264699	2174,8014	27303,8474	7065,54991	13518,5366	4513,0366	172483,022

Fuente: Instituto Geográfico Agustín Codazzi

Tabla 2.

Áreas (Ha). Vocación

Municipios	VASCP	VASCT	VASPCP	VCRH	VCRE	VCA	VCPICC	VCPICM	VCPSICC	VCPSICF	VCPSICM	VCTICC	VCTSICC	VFPCC	VFP	VPECC	VPECM	VPSICC	VPP
ABREGO	1,0174911		898,84774	1091,54553	48911,0359	417,369733		5924,92858	0	188,811348		1,1913962	299,158691		54798,4125		705,544122		24799,5581
CONVENCIÓN		2193,57608				537,105933		73,0288354	5073,31054				219,534255		3834,57274	867,808139	1,7134115	1315,46503	78991,0111
EL CARMEN		489,126806	129,463035			387,378404			2310,21409						39533,1734	52,2458718	48,5428935	2559,9039	127164,032
EL TARRA		2764,36408				701,699361			909,761057				1665,36454		1940,2227	269,324798		185,149165	61883,2538
HACARÍ			392,536595		1421,23131	187,982404					671,326461		466,645121		10447,5773			131,953998	28158,9589
LA PLAYA					12485,1233	14,9610316		348,893555			339,495119				2758,58595		470,926968		7774,73208
OCAÑA					8092,93942			546,954123							27915,8068		210,619173		14813,0671
SAN CALIXTO			1572,25655		2157,51884	54,8321845							133,361033		11719,5095				24125,362
SARDINATA	4128,30506		4223,23111			382,322116	3948,5015						5673,41127		24993,7266	2,6161745		2206,87192	101046,563
TEORAMA	0	1619,04462				226,347613			1035,43968				86,7458694		11983,587	121,059018		1799,51662	75791,2753
TIBU	36741,6409	7430,79989				2210,63386	33613,0015		8221,34491				39854,4051	441,438106	27288,1984	8071,13595		523,322171	101084,472

Fuente: Instituto Geográfico Agustín Codazzi

Tabla 3.

Áreas (Ha). Oferta ambiental

Municipios	AgrosilviCP	AgrosilviCT	grosilvopasC	APL	APrioC	CRE	CPICC	CPICM	CPSemICC	CPSemICF	CTICM	CTICC	CTSemICC	FPCC	FP	PECC	PECM	PSemICC	PP	zona urbana
ABREGO	1,01749108		553,312814	8087,99136	98869,896	1097,72521		4707,92034		104,136809		1,19139644	291,555524		9235,41256		629,91334		14478,3549	142,13897
CONVENCIÓN				58737,1235	10098,1085			62,4465386					219,534255		96,1427625	0,11485288	1,71341155		23895,9143	59,2043151
EL CARMEN				65897,3154	65069,1297				1155,5137						16784,1829		48,39562	973,12285	22764,4934	53,8556237
EL TARRA		818,301961		4338,49099	38089,2094				223,672212				1132,6595			35,4897875		136,794921	25544,5218	67,7423993
HACARÍ			386,030662		29031,0417						332,550052		411,289879					89,4406119	11629,6518	7,89586842
LA PLAYA			0	988,868062	17014,468	680,234434		138,303508			234,07298				1264,90558		400,818859		3477,51326	16,5009046
OCAÑA			0	4554,44916	26841,2805	4457,85367		297,605201							7857,57807		179,208519		7460,01755	603,708481
SAN CALIXTO			1527,33805	760,204253	25474,9233								95,9645918		918,862079				10985,5467	29,1766679
SARDINATA	2066,5105		3177,99229	133,676194	76769,2699		3848,18328						4362,43595		0	2,61617453		1652,83735	54601,8117	83,7266928
TEORAMA	0	269,523033		29908,5426	35630,0785				7,68055113				86,7458694		101,266633	32,9676277		644,695539	25981,8999	18,2565077
TIBU	16273,1365	2796,66105		1910,96748	163693,941		19473,9771		3242,36401				26341,1715	163,066015	1182,27536	2348,31612		389,534014	27701,4138	244,464426

Fuente: Instituto Geográfico Agustín Codazzi

Tabla 4.

Correlaciones entre las variables y los factores

	Variable	F1	F2	F3	F4
Conflicto de uso del suelo	CACAC	**0,627**	0,347	0,372	0,148
	CAPCP	0,106	-0,150	**0,596**	**-0,577**
	CAPCT	-0,199	**0,652**	-0,196	**-0,503**

	Variable	F1	F2	F3	F4
Conflicto de uso del suelo	CAPCPA	-0,010	**0,865**	0,495	-0,017
	CU	**0,662**	**0,485**	-0,374	-0,374
	DNAP	0,017	**0,972**	-0,008	-0,045
	DNAPP	**0,959**	0,121	-0,231	-0,049
	OCAUS	0,185	0,328	-0,190	**-0,698**
	SbrL	**0,518**	0,153	0,286	**0,548**
	SbrM	0,396	-0,217	**0,766**	-0,313
	SbrS	0,276	-0,161	**0,900**	-0,213
	SubL	**0,822**	-0,147	0,438	-0,284
	SubM	**0,916**	0,155	0,283	-0,171
	SubS	**0,894**	**0,403**	-0,107	0,020
Vocación de uso del suelo	VASCP	**0,973**	0,022	-0,191	-0,053
	VASCT	**0,869**	-0,118	-0,319	0,187
	VASPCP	0,047	-0,061	**0,849**	-0,412
	VCRH	-0,102	**0,931**	0,186	**0,193**
	VCRE	-0,202	**0,946**	0,063	0,068
	VCA	**0,949**	0,039	-0,142	0,164
	VCPICC	**0,973**	0,021	-0,187	-0,055
	VCPICM	-0,133	**0,954**	0,143	0,135
	VCPSICC	**0,805**	-0,128	-0,265	0,331
	VCPSICF	-0,102	**0,931**	0,186	0,193
	VCPSICM	-0,276	-0,182	-0,282	-0,063
	VCTICC	-0,102	**0,931**	0,186	0,193
	VCTSICC	**0,977**	0,013	-0,172	-0,062
	VFPCC	**0,951**	0,043	-0,286	-0,006
	VFP	0,236	**0,773**	0,341	0,065

	Variable	F1	F2	F3	F4
Vocación de uso del suelo	VPECC	**0,948**	0,014	-0,299	0,035
	VPECM	-0,270	**0,835**	-0,052	0,008
	VPSICC	0,152	-0,370	**0,654**	**0,381**
	VPP	**0,562**	-0,340	0,472	**0,428**
Oferta ambiental	AgrosilviCP	**0,974**	0,020	-0,179	-0,059
	AgrosilviCT	**0,917**	-0,022	-0,307	0,032
	AgrosilvopasCP	0,027	-0,112	**0,798**	-0,436
	APL	-0,109	-0,176	0,098	**0,708**
	APrioC	**0,874**	**0,403**	0,180	0,065
	CRE	-0,221	**0,424**	-0,312	**-0,626**
	CPICC	**0,981**	0,006	-0,117	-0,089
	CPICM	-0,121	**0,947**	0,159	0,155
	CPSemICC	**0,922**	0,003	-0,218	0,175
	CPSemICF	-0,102	**0,931**	0,186	0,193
	CTICM	-0,294	-0,179	-0,302	-0,063
	CTICC	-0,102	**0,931**	0,186	0,193
	CTSemICC	**0,979**	0,010	-0,152	-0,070
	FPCC	**0,951**	0,043	-0,286	-0,006
	FP	-0,096	**0,472**	0,097	0,270
	PECC	**0,951**	0,038	-0,287	-0,002
	PECM	-0,266	**0,846**	-0,041	0,021
	PSemICC	0,298	-0,291	**0,831**	-0,014
	PP	**0,450**	-0,281	**0,787**	-0,014
	Zona urbana	0,193	0,368	-0,298	**-0,630**

Fuente: autores.

Tabla 5.

Cos^2 de las variables

	Variable	F1	F2	F3	F4
Conflicto de uso del suelo	CACAC	0,394	0,121	0,138	0,022
	CAPCP	0,011	0,022	0,356	0,333
	CAPCT	0,039	0,425	0,038	0,253
	CAPCPA	0,000	0,748	0,245	0,000
	CU	0,438	0,235	0,140	0,140
	DNAP	0,000	0,944	0,000	0,002
	DNAPP	0,920	0,015	0,053	0,002
	OCAUS	0,034	0,107	0,036	0,487
	SbrL	0,269	0,023	0,082	0,301
	SbrM	0,157	0,047	0,587	0,098
	SbrS	0,076	0,026	0,810	0,045
	SubL	0,675	0,022	0,192	0,081
	SubM	0,839	0,024	0,080	0,029
	SubS	0,799	0,163	0,011	0,000
	UASC	0,688	0,000	0,223	0,041
Vocación de uso del suelo	VASCP	0,946	0,001	0,037	0,003
	VASCT	0,756	0,014	0,102	0,035
	VASPCP	0,002	0,004	0,721	0,170
	VCRH	0,010	0,867	0,035	0,037
	VCRE	0,041	0,895	0,004	0,005
	VCA	0,900	0,002	0,020	0,027
	VCPICC	0,947	0,000	0,035	0,003
	VCPICM	0,018	0,910	0,020	0,018
	VCPSICC	0,648	0,017	0,070	0,109
	VCPSICF	0,010	0,867	0,035	0,037

	Variable	F1	F2	F3	F4
Vocación de uso del suelo	VCPSICM	0,076	0,033	0,080	0,004
	VCTICC	0,010	0,867	0,035	0,037
	VCTSICC	0,954	0,000	0,029	0,004
	VFPCC	0,904	0,002	0,082	0,000
	VFP	0,055	0,598	0,116	0,004
	VPECC	0,898	0,000	0,089	0,001
	VPECM	0,073	0,697	0,003	0,000
	VPSICC	0,023	0,137	0,427	0,145
	VPP	0,316	0,115	0,223	0,183
Oferta ambiental	AgrosilviCP	0,950	0,000	0,032	0,004
	AgrosilviCT	0,841	0,000	0,094	0,001
	AgrosilvopasCP	0,001	0,012	0,637	0,191
	APL	0,012	0,031	0,010	0,501
	APrioC	0,764	0,162	0,032	0,004
	CRE	0,049	0,180	0,098	0,392
	CPICC	0,962	0,000	0,014	0,008
	CPICM	0,015	0,897	0,025	0,024
	CPSemICC	0,851	0,000	0,047	0,031
	CPSemICF	0,010	0,867	0,035	0,037
	CTICM	0,087	0,032	0,091	0,004
	CTICC	0,010	0,867	0,035	0,037
	CTSemICC	0,958	0,000	0,023	0,005
	FPCC	0,904	0,002	0,082	0,000
	FP	0,009	0,223	0,009	0,073
	PECC	0,905	0,001	0,082	0,000
	PECM	0,071	0,716	0,002	0,000

	Variable	F1	F2	F3	F4
Oferta ambiental	PSemICC	0,089	0,085	0,690	0,000
	PP	0,203	0,079	0,619	0,000
	Zona urbana	0,037	0,136	0,089	0,397

Fuente: autores.

Tabla 6.

Contribuciones de los municipios

Observación	F1	F2	F3	F4
ÁBREGO	0,937	78,776	3,143	3,386
CONVENCIÓN	0,701	3,443	0,610	8,124
EL CARMEN	0,015	0,585	3,498	23,476
EL TARRA	0,433	2,523	0,677	0,156
HACARÍ	2,908	2,462	2,945	0,241
LA PLAYA	4,910	0,351	5,411	0,089
OCAÑA	2,323	3,759	9,334	40,504
SAN CALIXTO	2,879	2,011	0,427	1,639
SARDINATA	2,123	3,178	66,417	15,894
TEORAMA	0,630	2,742	0,085	6,489
TIBÚ	82,141	0,170	7,453	0,003

Tabla 7.

Cos^2 de las observaciones

Observación	F1	F2	F3	F4
ÁBREGO	0,018	0,932	0,023	0,014
CONVENCIÓN	0,093	0,289	0,032	0,239
EL CARMEN	0,001	0,027	0,100	0,377
EL TARRA	0,073	0,269	0,045	0,006
HACARÍ	0,245	0,131	0,098	0,004

Observación	F1	F2	F3	F4
LA PLAYA	0,361	0,016	0,157	0,001
OCAÑA	0,097	0,099	0,154	0,374
SAN CALIXTO	0,360	0,159	0,021	0,045
SARDINATA	0,062	0,059	0,769	0,103
TEORAMA	0,120	0,331	0,006	0,275
TIBÚ	0,962	0,001	0,035	0,000

Fuente: autores.

Conflicto de intereses
Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Licencia de Creative Commons
Revista de Investigación Agraria y Ambiental is licensed under a Creative Commons Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual 4.0 Internacional License.

Received: September 3, 2025
Accepted: February 18, 2026
DOI: 10.22490/21456453.10349

CHARACTERIZATION OF STANDARD HYPERSPECTRAL REFLECTANCE SPECTRA FOR HIGH- AND LOW-PRODUCTIVITY SUGARCANE PLOTS USING FUNCTIONAL DATA ANALYSIS

CARACTERIZACIÓN DE ESPECTROS ESTÁNDAR DE REFLECTANCIA HIPERESPECTRAL PARA PARCELAS DE CAÑA DE AZÚCAR DE ALTA Y BAJA PRODUCTIVIDAD MEDIANTE ANÁLISIS DE DATOS FUNCIONALES

Aldemar Reyes-Trujillo [1]
Johann Alexis Ospina-Galíndez [2]
Jhony Armando Benavides-Bolaños [3]

How to cite: Reyes-Trujillo, A., Ospina-Galíndez, J. A., & Benavides-Bolaños, J. A. (2026). Characterization of standard hyperspectral reflectance spectra for high- and low-productivity sugarcane plots using functional data analysis. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental, 17*(2), 331-354. https://doi.org/10.22490/21456453.10349

[1] PhD in Sanitary and Environmental Engineering, Professor at Universidad del Valle, Cali, Colombia; aldemar.reyes@correounivalle.edu.co

[2] MSc in Statistics, Professor at Universidad Autónoma de Occidente, Cali, Colombia; jaospina@uao.edu.co

[3] PhD in Soil Science and International Agriculture and Development, Professor at Universidad del Valle, Cali, Colombia; jhony.benavides@correounivalle.edu.co
Corresponding author

RESUMEN

Contextualización: La caña de azúcar es un cultivo clave para la agricultura tropical y una fuente de azúcar, etanol y bioenergía. El Valle del Cauca, en Colombia, se encuentra entre las regiones productoras más eficientes del mundo. En este contexto, la intensificación sostenible exige métodos precisos y no destructivos para monitorear el desarrollo del cultivo y predecir su rendimiento.

Vacío de conocimiento: Los índices de vegetación tradicionales, calculados a partir de bandas multiespectrales amplias, como el índice de vegetación de diferencia normalizada, se saturan en doseles densos y presentan una sensibilidad limitada a variaciones fisiológicas y estructurales sutiles, lo que restringe la predicción temprana del rendimiento. Aunque el análisis hiperespectral ofrece un mayor nivel de detalle, la mayoría de los estudios se basa en índices discretos. La aplicación de enfoques estadísticos funcionales al cultivo de caña de azúcar aún es limitada, lo que deja un vacío en la clasificación temprana de la productividad.

Propósito: Este estudio evaluó si el análisis funcional de datos de reflectancia hiperespectral puede mejorar la clasificación temprana de la productividad de la caña de azúcar. Los objetivos fueron distinguir niveles de productividad, comparar mediciones a escala foliar y de dosel, y analizar la influencia de la etapa de crecimiento en la variabilidad espectral.

Metodología: Se recolectaron datos de reflectancia hiperespectral en seis parcelas del Valle del Cauca durante dos etapas de crecimiento, a los 2,5 y 5,5 meses, tanto a escala foliar como de dosel. Los espectros sin procesar se transformaron en curvas funcionales continuas mediante suavizado con funciones B-spline. Posteriormente, se calcularon medias funcionales y se aplicaron pruebas t basadas en permutaciones para identificar diferencias significativas entre las clases de productividad.

Resultados y conclusiones: Los espectros del dosel permitieron distinguir con claridad las parcelas de alta y baja productividad, especialmente en la región del infrarrojo cercano, donde la mayor biomasa y área foliar de las parcelas con mayor rendimiento produjeron una reflectancia más alta. Los espectros foliares mostraron una capacidad de discriminación menor, en particular durante las etapas posteriores del crecimiento. El análisis funcional preservó características espectrales que los índices tradicionales pasaban por alto, lo que permitió interpretar mejor la variabilidad del cultivo. El análisis funcional de datos hiperespectrales a escala del dosel constituye una herramienta robusta y no destructiva para la evaluación temprana del rendimiento; asimismo, respalda la toma de decisiones en agricultura de precisión relacionadas con la fertilización, el riego y el manejo del cultivo.

Palabras clave: agricultura de precisión, espectrometría, productividad, reflectancia.

ABSTRACT

Contextualization: Sugarcane is a key crop in tropical agriculture, providing sugar, ethanol, and bioenergy. Valle del Cauca Department, Colombia, is among the world's most productive sugarcane-growing regions, where sustainable intensification requires accurate, nondestructive methods to monitor crop development and predict yield.

Knowledge gap: Traditional vegetation indices calculated from broad multispectral bands, such as the Normalized Difference Vegetation Index, saturate in dense canopies and have limited sensitivity to subtle physiological and structural variations, restricting early yield prediction. Although hyperspectral analysis provides greater detail, most studies rely on discrete indices. Functional statistical approaches remain underused in sugarcane research, leaving a gap in the early classification of productivity.

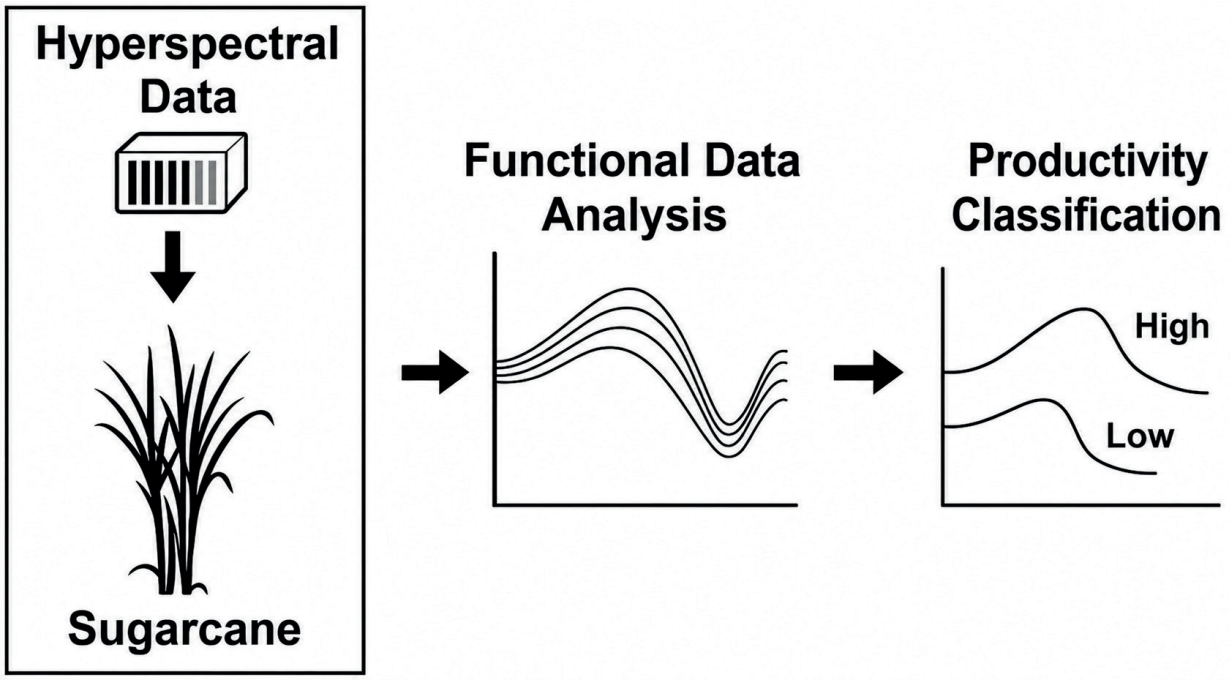
Objective: This study evaluated whether functional data analysis of hyperspectral reflectance can improve the early classification of sugarcane productivity. The specific objectives were to distinguish productivity levels, compare canopy- and leaf-scale measurements, and analyze the influence of growth stage on spectral variability.

Methodology: Hyperspectral reflectance data were collected from six plots in Valle del Cauca at two growth stages, 2.5 and 5.5 months, at both the canopy and leaf scales. The raw spectra were converted into continuous functional curves using B-spline smoothing. Functional means and permutation-based *t*-tests were then used to identify significant differences between productivity classes.

Results and conclusions: Canopy spectra clearly distinguished high- and low-productivity plots, particularly in the near-infrared region, where greater biomass and leaf area in high-productivity plots resulted in higher reflectance. Leaf spectra showed weaker discrimination, especially at later growth stages. Functional data analysis preserved spectral characteristics often overlooked by traditional indices, enabling a more detailed interpretation of crop variability. Canopy-scale functional hyperspectral analysis provides a robust, nondestructive tool for early yield assessment and supports precision agriculture decision-making related to fertilization, irrigation, and crop management.

Keywords: precision agriculture, spectrometry, productivity, reflectance.

GRAPHICAL ABSTRACT:



Source: Authors.

1 INTRODUCTION

Sugarcane (*Saccharum officinarum*) is a major crop in global agriculture and a primary source of sugar, ethanol, and bioenergy. It occupies more than 26 million hectares worldwide and plays a crucial role in the economies of tropical and subtropical regions (Voora et al., 2023). In 2020, global production reached 1.87 billion tons and is projected to increase to 1.96 billion tons by 2030 due to improved yields and expanded cultivation areas (OECD/FAO, 2021). The sugarcane industry supports more than 100 million jobs in over 120 sugarcane-producing countries, making it vital to rural economies (Voora et al., 2023). Growing demand for sugarcane-derived products underscores the need for advanced methods for analyzing field data to improve yield estimation, optimize resource use, and ensure sustainable crop management (Ungureanu et al., 2022).

Traditional vegetation indices, such as the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and the Soil-Adjusted Vegetation Index, are widely used to assess crop health. However, these indices have limitations, particularly in high-biomass crops such as sugarcane, because NDVI saturates in dense canopies, reducing its ability to detect subtle differences in productivity (Zhang et al., 2024). Although NDVI has proven useful for predicting sugarcane yield and detecting

stress (Rahman & Robson, 2016), its standard formulation based on broad multispectral bands is highly sensitive to environmental conditions and has limited ability to detect early-stage stress. These limitations compromise its reliability for accurately assessing sugarcane health and productivity (de Lima et al., 2021).

To address these shortcomings, hyperspectral analysis and near-infrared (NIR) spectroscopy have emerged as more precise approaches for assessing sugarcane quality parameters, including Brix, Pol, and fiber content, which are crucial for determining crop quality and processing efficiency (Corrêdo et al., 2021; El-Hendawy et al., 2017).

Hyperspectral reflectance has also been used to estimate nitrogen (N) concentrations in sugarcane fields (Martins et al., 2024; Zhang et al., 2024). A study conducted in Cali, Colombia, used hyperspectral data to assess canopy N content under varying fertilization rates and identified key spectral regions (450–505 nm, 671 nm, and 719–760 nm) that were sensitive to variation in N levels (Reyes-Trujillo et al., 2021). These findings are consistent with broader research showing that hyperspectral indices in the red-edge and NIR regions are closely associated with plant health and nutrient status (Reyes-Trujillo et al., 2021).

Emerging methods such as functional data analysis (FDA) are gaining prominence in remote sensing applications because they enable the continuous representation of spectral variation, improve predictive accuracy, and reduce noise (Grygar et al., 2024; Matsui & Mochida, 2024; Ullah & Finch, 2013). FDA has been successfully applied in agriculture to assess chlorophyll content and canopy structure, and to predict yield (Som-ard et al., 2021).

In viticulture, FDA combined with functional partial least squares and functional principal component analysis has improved canopy vigor classification and stress detection (Vélez et al., 2022). Similarly, integrating machine learning models with FDA has improved sugarcane yield prediction, demonstrating the feasibility of hybrid approaches that leverage both spectral and structural crop information (Li et al., 2023).

Despite its advantages, the application of FDA in sugarcane research remains limited. Most studies continue to rely on discrete vegetation indices, which may overlook key spectral features that distinguish high- and low-productivity areas. Moreover, multiscale spectral analyses incorporating both canopy- and leaf-scale measurements are needed because leaf-scale measurements can be used to calibrate and adjust canopy-scale models. Canopy architecture influences vegetation spectral responses and affects the sensitivity of measurements to variations caused by nutrient or water stress (Reyes-Trujillo, 2020).

Therefore, the primary objective of this study was to evaluate the effectiveness of FDA applied to hyperspectral reflectance data for the early classification of sugarcane productivity in Valle del Cauca, Colombia. The specific objectives were (i) to assess the ability of FDA to distinguish between high- and low-productivity sugarcane plots using hyperspectral reflectance spectra, (ii) to

compare the discriminatory power of canopy- and leaf-scale spectral measurements for productivity classification, and (iii) to evaluate the influence of crop growth stage on spectral variability and classification accuracy. The findings are expected to contribute to the development of robust, non-destructive remote sensing methods that support precision agriculture strategies for optimizing crop management in intensive sugarcane production systems.

2 MATERIALS AND METHODS

2.1. STUDY AREA AND EXPERIMENTAL DESIGN

The study was conducted on six plots associated with the Ingenio del Cauca sugar mill in the Cauca River Valley, Cauca Department, Colombia. The plots were planted with the CC 01-1940 sugarcane variety (Viveros Valens, 2018), managed using conventional agronomic practices, and had similar soil and climatic conditions, crop ages, and N fertilization regimes. The average vegetative period of sugarcane in the Cauca River Valley is 12.5 months after emergence (MAE), although harvesting the CC 01-1940 variety after 13 MAE is recommended to optimize sucrose production. The total experimental area covered 51.7 hectares (Figure 1; Table 1).

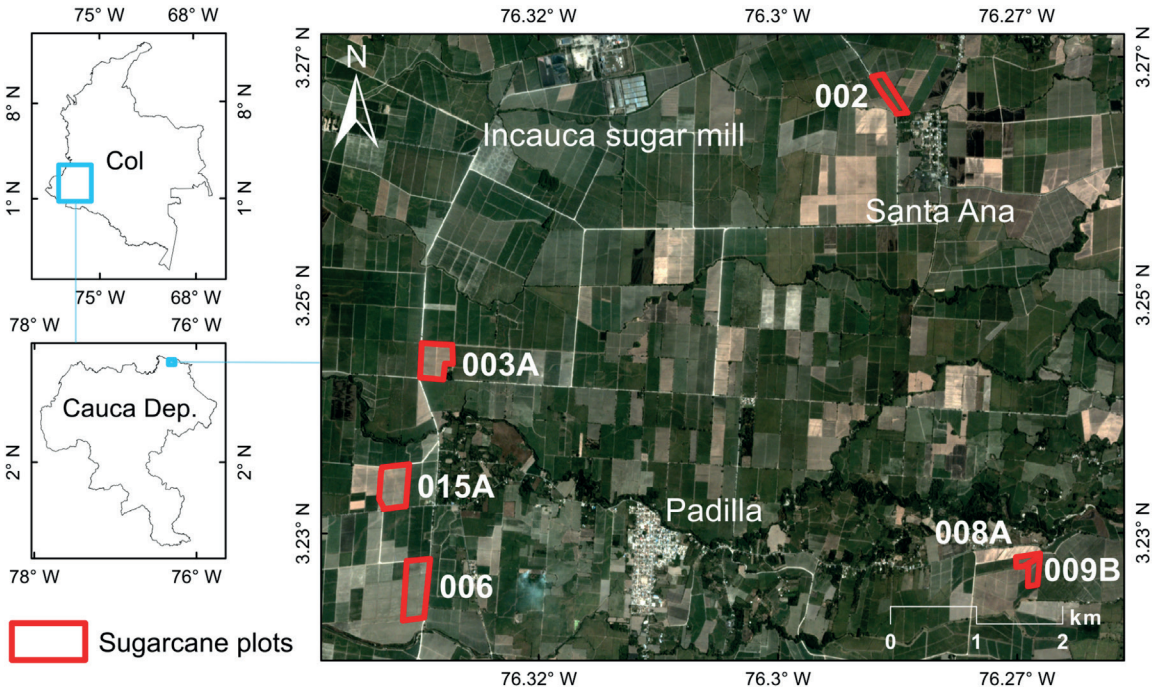


Figure 1. Geographic Location of the Experimental Plots Included in the Study (Col = Colombia; Cauca Dep. = Cauca Department).

Source: Authors.

Table 1.

Physical and Agronomic Characteristics of the Experimental Sugarcane Plots, Including Area, Ratoon Number (RN), Total Cane Yield per Hectare (TCH), Soil Texture, and N Fertilization Rates

Plot	Area (ha)	RN	TCH	Soil texture	Fertilization (kg/ha)
009B	3.11	2	135	L, SL	350
008A	4.55	1	118	CL, SCL, SiL	350
002	5.85	1	86	L, SiL	350
015A	3.74	4	112	L, SiL	350
006	12.68	1	123	L, SiL	375
003A	5.40	1	132	L, SiL	350

Note. L = loam; SL = sandy loam; CL = clay loam; SCL = sandy clay loam; SiL = silt loam. Fertilization consisted of the application of urea (46%).

Source: Authors.

The study area is located in agroecological zone 11H3 (Carbonell González et al., 2011). The soils are characterized by fine, loamy textures over clayey subsoils, and belong to the Mollisol order. These soils are found predominantly on the middle and lower slopes of alluvial fans under an udic moisture regime. Annual rainfall in the region ranges from 200 to 600 mm, with an average temperature of 23.7 °C and an average elevation of 1,005 m above sea level. The experiment was monitored at two key early growth stages: the end of tillering at 2.5–3 months of age in December 2023, and the rapid vegetative growth stage at 5.5–6 months of age in March 2024. Monitoring at these stages enables timely field management decisions to address production constraints during the current crop cycle, whereas assessments at later phenological stages primarily inform adjustments for subsequent ratoon crops.

2.2. SAMPLING AND ACQUISITION

The hyperspectral data sampling protocol used in this study followed a multistage sampling approach, implemented during two measurement campaigns under an uncontrolled experimental design. First, the primary sampling unit was defined by dividing the total number of rows in each plot by the minimum number of access rows required for machinery, and then adding a random number between 1 and the resulting quotient to select the specific row to sample. Next, the secondary sampling unit was defined as a randomly selected 10-m longitudinal

section nested within each selected row. Finally, a randomly selected 1-m tertiary sampling unit, corresponding to a specific sugarcane plant, was nested within the secondary unit.

Direct optical spectral measurements were performed at the leaf scale within the tertiary sampling unit. Optical spectra were measured at the canopy scale within the secondary sampling unit. The number of primary sampling units (furrows) selected for each plot was as follows: 9 for plots 009B and 008A, 9 for plot 002, 7 for plot 015A, 8 for plot 006, and 10 for plot 003A. The workflow is shown in Figure 2.

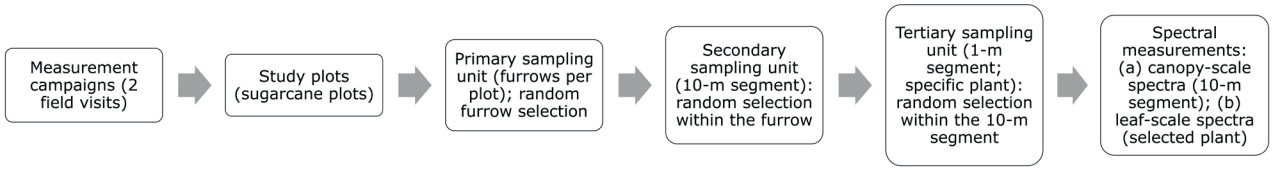


Figure 2. Multistage Hyperspectral Sampling Protocol.

Source: Authors.

2.3. SPECTRAL MEASUREMENTS

A hyperspectral measurement system based on optical spectroscopy in the visible-to-near-infrared (VIS-NIR) range was developed to collect spectral data. The system was configured to acquire diffuse reflectance spectra with an integration time of 200 ms, with five readings averaged per sample. Diffuse reflectance refers to incident radiation that is scattered by a surface in multiple directions, providing a measure of surface properties independent of the viewing angle (Benavides-Bolaños et al., 2025). Measurements were taken at 9:00 a.m. and 3:00 p.m. during the tillering (2.5–3 months) and rapid vegetative growth (5.5–6 months) stages of the sugarcane crop.

For leaf-scale measurements, an STS:-VIS-NIR microspectrometer was used (Ocean Optics, Dunedin, FL, United States). The sensor had an optical resolution of 1.5 ± 0.05 nm and 1,024 pixels and was coupled to a multimode optical fiber optimized for the VIS-NIR range. The fiber, which had a diameter of 200 µm and an optical aperture of 0.22, was used to collect leaf-scale spectral data. All measurements were stored on a laptop for subsequent analysis.

For canopy-scale measurements, the system was configured to acquire continuous spectral readings over a 60-s period along a 10-m transect, corresponding to the length of the secondary sampling unit. The system consisted of two main components: (1) an aboveground unit (AGU), responsible for collecting diffuse reflectance spectra, and (2) a ground-based reference unit (GBRU), used for calibration. The AGU comprised a hyperspectral sensor mounted on a mechanically and electronically stabilized platform. The system featured an adjustable

optical aperture ranging from 1° to 28° and was positioned 1 m above the crop canopy to measure reflectance.

The GBRU, used to acquire reference irradiance measurements, incorporated a Spectralon Reference Panel (Ocean Optics, Dunedin, FL, United States) with 99% reflectivity across the 400–1,500 nm spectral range. This configuration made it possible to monitor changes in reference irradiance, prevent saturation, minimize the effects of variations in lighting conditions, and ensure measurement comparability (Reyes-Trujillo, 2020; Reyes-Trujillo et al., 2021). The unit was positioned independently to enable real-time calibration and correction of hyperspectral measurements under field conditions during all measurement campaigns.

2.4. DETERMINATION OF STANDARD SPECTRA

Based on the exploratory analysis of the hyperspectral data collected under the uncontrolled experimental design, standard diffuse reflectance spectra were developed for the tillering and rapid growth stages of the CC 01-1940 sugarcane variety. FDA was subsequently applied (Ramsay & Dalzell, 1991; Ramsay & Silverman, 2005; Ullah & Finch, 2013), using B-spline smoothing to fit hyperspectral reflectance curves across the continuous wavelength range with a set of functions, $\{\phi_k\}(_{K\in N})$. These fitted curves are hereafter referred to as functional data.

The B-spline basis functions (Eubank, 1999) allow the functions in the dataset to be approximated, thereby facilitating analysis. The fundamental properties of B-splines are as follows: (a) each basis element $\phi_k(w)$ is a spline function of order m on a partition τ; (b) any linear combination of spline functions is also a spline function; and (c) any spline function of order m on a given partition τ can be expressed as a linear combination of the basis functions.

In FDA, the dataset is treated as a collection of continuous curves rather than as discrete vectors, as is done in classical multivariate analysis. These functional representations are obtained through regression models optimized by cross-validation. Functional data are formally defined using a set of basis functions, $\{\phi_k\}(_{K\in N})$, such that any function can be represented as a linear combination of these basis functions, as follows:

$$x(w) = \sum_{k=1}^{K} c_k \phi_k(w) \quad (1)$$

where $\phi_k(w)$ denotes a basis function and c_k is the corresponding coefficient (Equation 1).

Once the functional data have been constructed, classical statistical concepts are extended to the functional domain. This extension enables the derivation of descriptive functions, such as slopes and inflection points, which improve the interpretability of hyperspectral curves. The standard spectra were determined using functional descriptive

statistics, as described elsewhere (Ramsay & Silverman, 2005):

$$\text{Functional mean: } \underline{x}(w) = N^{-1} \sum_{i=1}^{N} x_i(w) \quad (2)$$

$$\text{Functional variance: } V[x(w)] = (N-1)^{-1} \sum_{i=1}^{N} \left[x_i(w) - \underline{x}(w)\right]^2 \quad (3)$$

where $x_i\,(w)$ represents an individual spectral observation and $\underline{x}\,(w)$ is the functional mean (Equations 2 and 3).

To further analyze the functional data and identify spectral differences between sugarcane productivity classes, a functional *t*-test based on the permutation method was applied (Coffey & Hinde, 2011). This test generates a null distribution for the test statistic and calculates the corresponding *p* value to assess statistical significance.

The functional *t*-test was performed using the permutation procedure proposed by Ramsay and Dalzell (1991), which involves the following steps:

1. Specify the number of points (n) and the number of permutations (d).
2. Shuffle the labels of the functional curves d times and compute the test statistic for each permutation at all n points. The resulting $T_{null\ values}\,(w)$ are stored in an $n \times d$ matrix.
3. Determine the maximum difference for each permutation across the n points. These differences form a null distribution represented by $T_{null}\,(w)$, resulting in a column vector of length d.
4. Compute the original test statistic for the unshuffled dataset, $T(w)$, at the n points. The largest of these values is $T_{Max\ observed)}\,(w)$.
5. Calculate the pointwise critical-value curve as the quantile $[T_{null\ values}\,(w); \alpha]$ across all permutations at each point. This yields an n-dimensional column vector.
6. Determine the maximum critical value, denoted as $T_{null}\,(w)$.

3 RESULTS AND DISCUSSION

For this analysis, diffuse reflectance spectra collected at the canopy and leaf scales during two measurement campaigns under an uncontrolled experimental design were compiled into a database. The collected spectra were classified according to the productivity class assigned to each plot.

Table 2 presents the number of diffuse reflectance spectra collected at the canopy and leaf scales during the two measurement campaigns. The table distinguishes between high- and low-productivity plots and provides a breakdown of spectral acquisitions by plot. Plots with TCH > 120 t/ha were

classified as high-productivity, whereas those with TCH < 120 t/ha were classified as low-productivity, based on the national average sugarcane yield in Colombia. Notably, the high-productivity plots (003A: 132 t/ha, 009B: 135 t/ha, and 006: 123 t/ha) consistently had more spectral acquisitions than the low-productivity plots (002: 86 t/ha, 008A: 118 t/ha, and 015A: 112 t/ha), indicating differences in structural characteristics that may have influenced the spectral responses.

Table 2.

Number of Diffuse Reflectance Spectra Acquired at the Canopy and Leaf Scales, Grouped by Productivity Class and Measurement Campaign

Plot	Canopy-Scale R	Leaf-Scale R	Productivity classification
003A	950	50	High
009B	855	45	High
006	760	40	High
002	855	45	Low
008A	855	45	Low
015A	665	35	Low
Campaign 1	4,940	260	
Campaign 2	4,940	260	
Total	9,880	520	

Source: Authors.

After the database was compiled and an exploratory analysis was performed, the spectral data were transformed using functional data analysis techniques, as described below.

Figure 3 illustrates the transformation of raw reflectance spectra into smooth, functional curves using FDA at the canopy scale. The raw spectral data exhibit noise and fluctuations caused by environmental conditions and sensor variability, particularly in the 770–800 nm region. After FDA was applied, the spectra retained key absorption features, while random noise was reduced, improving interpretability. The smoothed curves provide a clearer representation of spectral variation attributable to differences in leaf area, canopy structure, and solar radiation interception; the latter is influenced by pronounced fluctuations in incident solar radiation caused by changes in cloud cover that are characteristic of tropical climates.

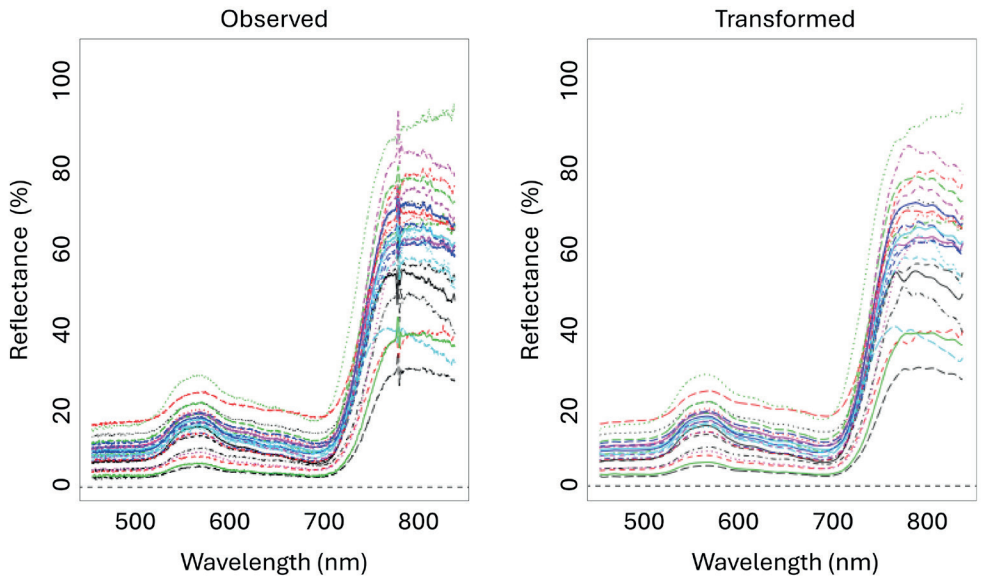


Figure 3. Comparison of Observed and Functionally Transformed Reflectance Spectra at the Canopy Scale, Illustrating the Preservation of Key Spectral Features.

Source: Authors.

The functional mean reflectance was then calculated for each type of spectral data and for plot groups classified by productivity level. Figure 4 presents the functional mean reflectance spectra at both the canopy and leaf scales for Campaign 1. These curves exhibit the characteristic spectral response of vegetation, with a reflectance peak in the green region and a pronounced increase in the NIR region.

At the canopy scale (Figure 4a), high-productivity plots show lower reflectance across the visible region and higher reflectance in the NIR region, suggesting greater chlorophyll content and better overall plant health. At the leaf scale (Figure 4b), differences in spectral reflectance between high- and low-productivity plots are much less pronounced across all wavelengths, indicating that canopy-scale analysis is more effective for distinguishing productivity levels.

The spectral differences observed in low-productivity plots within the 750–820 nm NIR range, characterized by higher reflectance, may indicate water stress due to increased scattering associated with reduced leaf water content and a lower refractive index (Katsoulas et al., 2016). They may also reflect physiological changes, such as alterations in xanthophyll pigments affecting the photochemical reflectance index (PRI) detectable in this region (Gamon et al., 1992; Nakamura et al., 2024). These findings reinforce the need for multiscale spectral assessment.

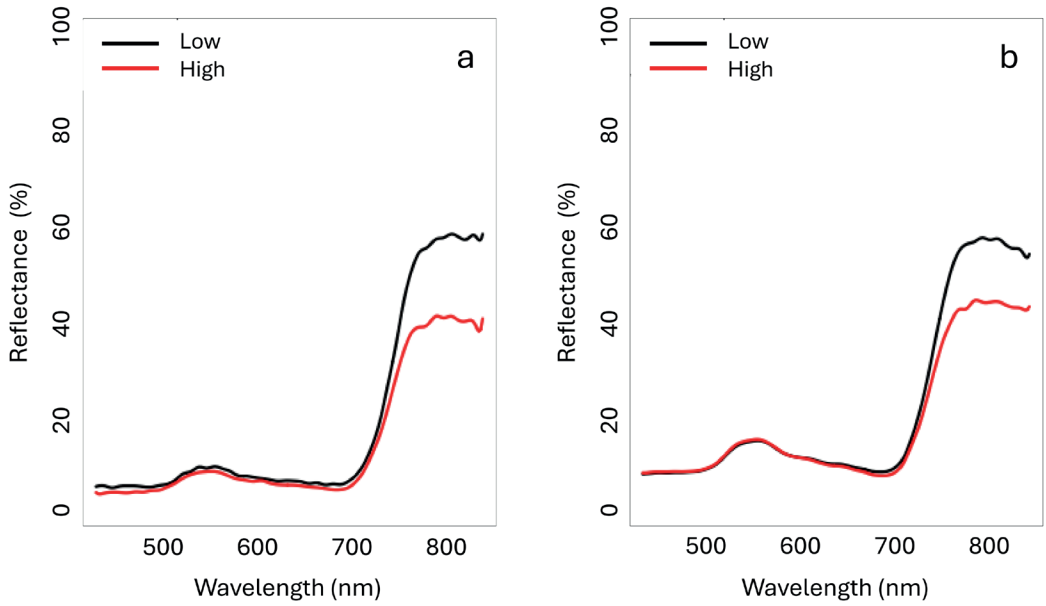


Figure 4. Functional Mean Reflectance Spectra at (a) the Canopy Scale and (b) the Leaf Scale, Grouped by Productivity Class.

Source: Authors.

The observed spectral patterns require stage-specific interpretation that accounts for measurement scale and physiological context. At the early growth stage (2.5 months), leaf development is limited; therefore, differences in the NIR region (750–820 nm) primarily reflect variations in leaf water content, rather than canopy structure. Low-productivity plots exhibit higher NIR reflectance, indicating water stress due to increased scattering associated with reduced leaf water content and refractive index (Katsoulas et al., 2016).

At the canopy scale, higher reflectance in the VIS region in low-productivity plots suggests stress-induced reductions in photosynthetic pigments and enzymes (Katsoulas et al., 2016; Peñuelas et al., 1994). These findings highlight the ability of FDA to reveal subtle, physiologically meaningful spectral differences that cannot be detected using broadband indices.

Figure 5 presents the results of a functional *t*-test comparing mean reflectance spectra at the canopy scale between high- and low-productivity plots. Statistically significant spectral differences were observed across nearly the entire spectral range, particularly in the NIR region, where the structural and physiological properties of the canopy strongly influence reflectance. This finding suggests that hyperspectral canopy data are highly effective for distinguishing productivity levels and may serve as a reliable predictor of sugarcane performance.

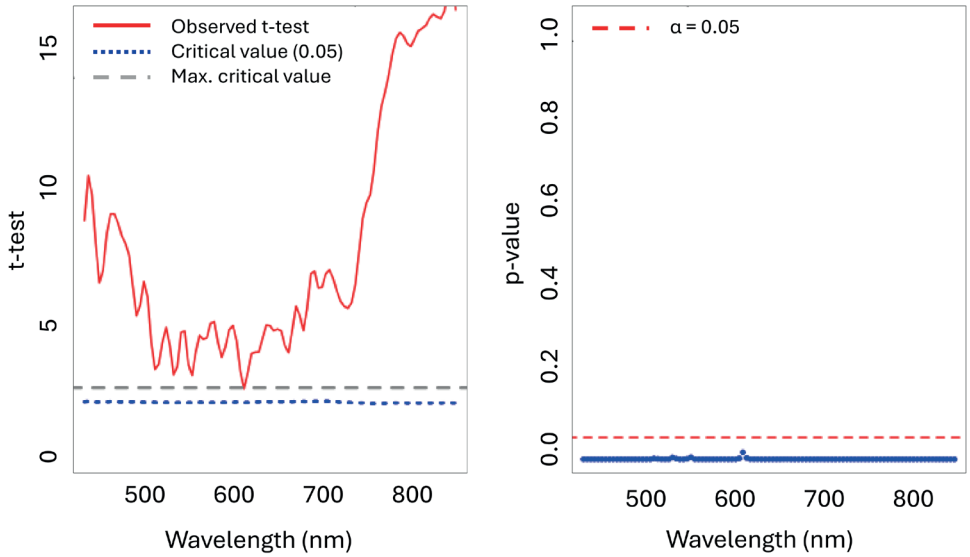


Figure 5. Functional t-test Results Comparing Mean Reflectance Spectra at the Canopy Scale, Highlighting Significant Differences Across the Entire Spectral Range.

Source: Authors.

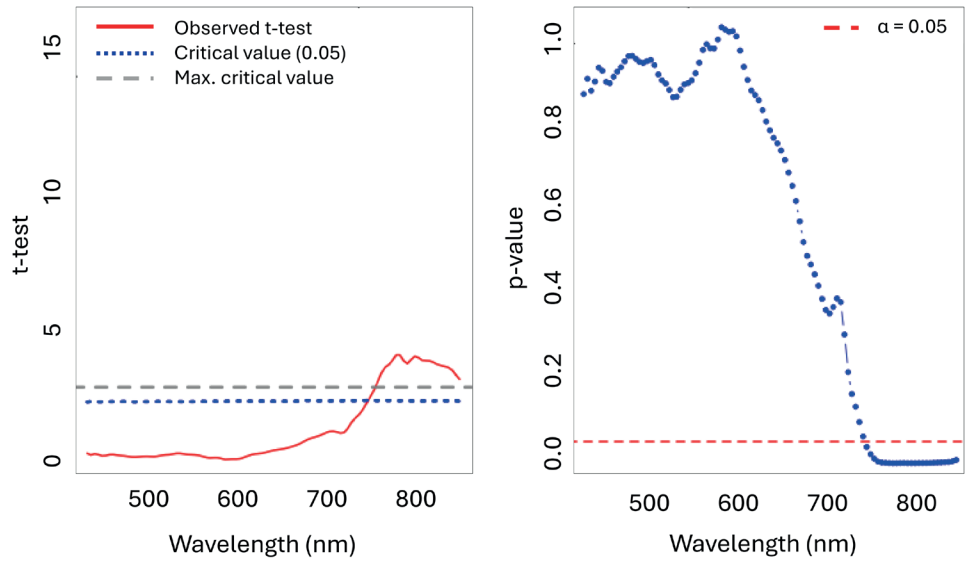


Figure 6. Functional *t*-test Results Comparing Mean Reflectance Spectra at the Leaf Scale, Showing Significant Differences Only in the NIR Region.

Source: Authors.

Figure 6 presents the results of the functional *t*-test at the leaf scale, showing that statistically significant spectral differences are limited to the NIR region. This finding indicates that, although leaf reflectance contains useful information, it is less robust than

canopy-scale measurements for detecting differences in productivity. The lower spectral sensitivity at this scale may be attributed to localized variation in leaf properties that does not fully reflect the broader physiological condition of the crop (Carter & Knapp, 2001; Katsoulas et al., 2016; Reyes-Trujillo, 2020).

Figure 7 compares the functional mean reflectance spectra at the canopy and leaf scales during the later growth stage (5.5 months). At the canopy scale (Figure 7a), high-productivity plots exhibit higher NIR reflectance than low-productivity plots, consistent with a more developed canopy architecture and greater aboveground biomass, which modify internal light scattering as the crop matures. At the leaf scale (Figure 7b), spectral differences remain small across wavelengths, reinforcing the greater sensitivity of canopy-scale measurements for productivity classification compared with leaf-scale measurements.

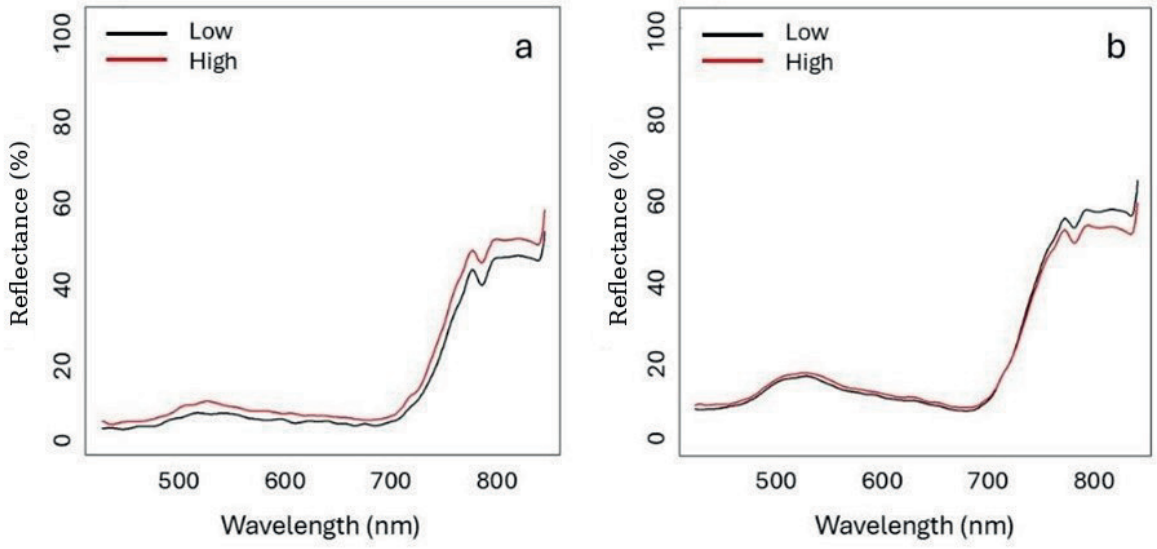


Figure 7. Functional Mean Reflectance Spectra at (a) the Canopy Scale and (b) the Leaf Scale for Growing Season 2 (5.5 Months), Grouped by Productivity Class.

Source: Authors.

Figure 8 presents the results of the functional *t*-test for canopy reflectance spectra at the later growth stage (5.5 months). Statistically significant differences were detected across nearly the entire spectral range, indicating that canopy-scale hyperspectral measurements remain highly sensitive to productivity-related variation at later growth stages. Consistent with the functional mean spectra shown in Figure 7a, these differences reflect the influence of a more developed canopy structure in high-productivity plots, where leaf area, aboveground biomass, leaf angle, and leaf age exert greater control over spectral behavior (Lepine et al., 2016). Consequently, canopy-scale measurements

provide more informative data than leaf-scale measurements for capturing the combined effects of nutrient accumulation and canopy architecture on productivity.

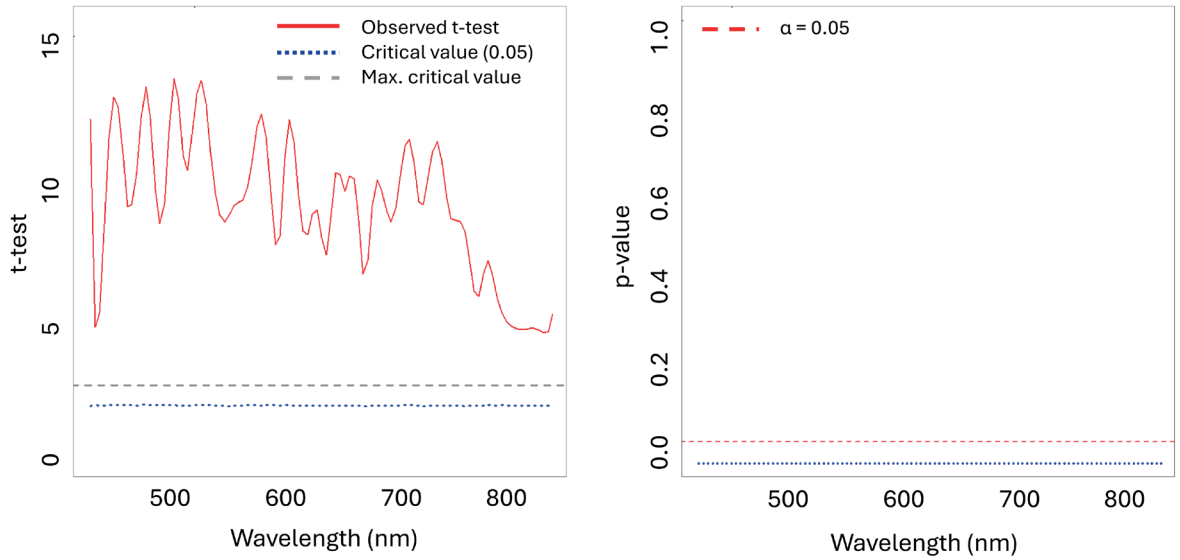


Figure 8. Functional *t*-test Results Comparing Reflectance Spectra at the Canopy Scale for Growing Season 2, Highlighting Significant Spectral Differences.

Source: Authors.

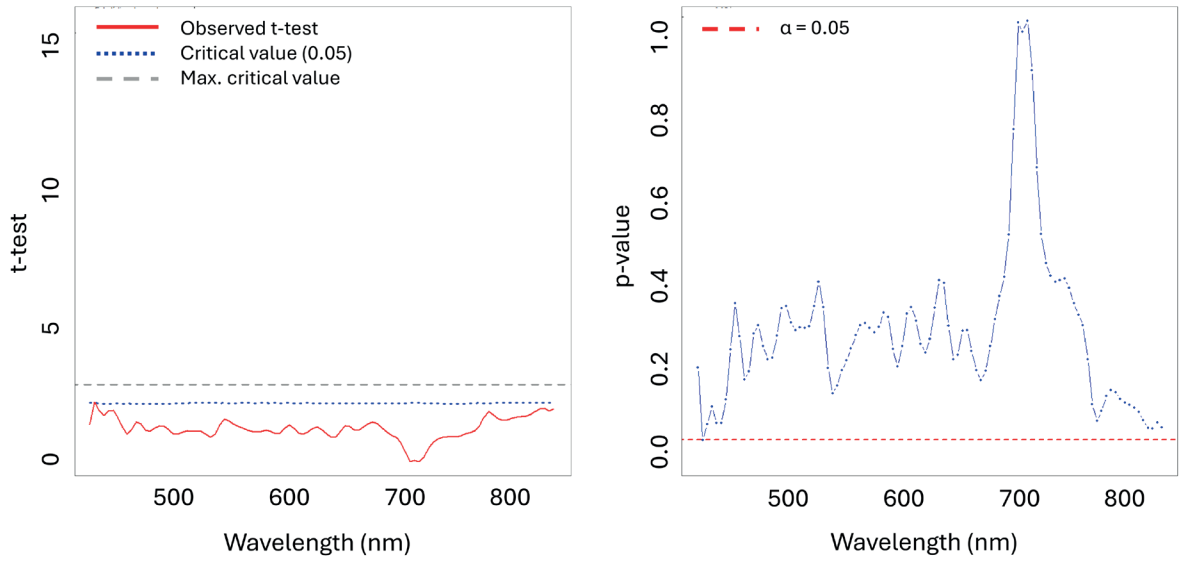


Figure 9. Functional *t*-test Results Comparing Reflectance Spectra at the Leaf Scale for Growing Season 2, Showing No Statistically Significant Differences.

Source: Authors.

Figure 9 presents the results of the functional *t*-test for leaf reflectance spectra at the later growth stage. Unlike the canopy-scale results, no statistically significant differences were detected at the leaf scale, suggesting that, as the crop matures, leaf spectral variation becomes less indicative of differences in productivity. This finding may be attributed to nutrient redistribution dynamics and canopy homogenization, which reduce the spectral contrast between high- and low-productivity plots (Reyes-Trujillo, 2020).

The application of FDA transformed hyperspectral reflectance spectra into continuous functions, enabling more nuanced statistical analysis and interpretation of spectral variation. Unlike traditional approaches that rely on discrete spectral bands or vegetation indices, which often fail to capture subtle but important differences, FDA preserves key spectral features, such as inflection points, peak widths, and local minima and maxima (Oliveira et al., 2020; Rincón-Fonseca et al., 2021). This approach enabled a more detailed assessment of spectral responses across sugarcane plots in different productivity classes.

A key finding of this study was the higher mean reflectance observed in the 750–820 nm range in low-productivity plots during the early growth stage (Figure 4). At this stage, canopy architecture is still poorly developed; therefore, differences in NIR reflectance are driven primarily by leaf-level water status rather than canopy structure. Previous studies have established an inverse relationship between leaf water content and NIR reflectance, with water-stressed plants exhibiting higher reflectance because of increased light scattering and changes in the refractive index (Holzman et al., 2021; Jin et al., 2017; Katsoulas et al., 2016; Liu et al., 2024). This finding highlights the potential of hyperspectral sensing for the early detection of water stress, which could support timely irrigation adjustments and improve overall productivity.

Significant differences in reflectance were also observed in the VIS region at the canopy scale (Figure 4a). These variations likely reflect differences in crop physiological status associated with field water and nutrient availability, ranging from limiting to nonlimiting conditions, that affect chlorophyll concentration and photosynthetic performance. Chlorophyll content, particularly in the spectral regions around 550 nm and 670 nm, has been shown to be strongly correlated with leaf reflectance, making VIS-region spectral analysis a useful tool for monitoring plant health (Arruda et al., 2024; Gai et al., 2024; Tavares et al., 2023; Zhang et al., 2023).

Functional *t*-tests confirmed statistically significant differences in canopy reflectance across the entire spectral range (Figure 5), whereas at the leaf scale, significant differences were evident only in the NIR region (Figure 6).

During the second growing season (5.5 months), reflectance spectra were analyzed for plots with different productivity levels (Figure 7). At the canopy scale, clear differences were detected between the functional mean reflectance spectra of high- and low-productivity plots (Figure 8). At the leaf scale, no statistically significant differences were found (Figure 9), likely because of the

rapid nutrient accumulation that characterizes this growth stage in the CC 01-1940 variety (Viveros Valens, 2018). Previous research has shown that sugarcane takes up the greatest proportion of major nutrients between 5 and 6 months of growth, influencing its spectral responses (Kumar et al., 2023; Leal Junior et al., 2025).

Canopy-scale spectral measurements provided more reliable assessments of productivity-related variation, as higher reflectance values were consistently associated with high-productivity plots (Figure 7a). These differences are likely attributable to variation in canopy structural traits, including leaf area, aboveground biomass, leaf angle, and leaf maturity, all of which directly affect spectral signatures (Quemada et al., 2021; Tang et al., 2023). These findings suggest that canopy-scale hyperspectral analysis is better suited to productivity assessment than leaf-scale measurements because it integrates both physiological and structural attributes that influence crop performance.

Conventional spectral indices, such as the NDVI, are often constrained by their reliance on scalar transformations, which can obscure subtle spectral variations by averaging complex signals. Recent studies have shown that hyperspectral data, particularly when analyzed using advanced statistical techniques, provide a more detailed and accurate assessment of vegetation status than broadband indices (Chanchí-Golondrino et al., 2024; Liu et al., 2024).

The interpretation of functional mean reflectance spectra should account for the influence of agroecological conditions, agronomic practices, temporal nutrient dynamics, and canopy architecture. This study demonstrates that hyperspectral analysis combined with FDA offers a scalable and efficient approach to monitoring crop variability and predicting sugarcane yield during early growth stages. Using this methodology, sugarcane producers could optimize fertilization, irrigation, and canopy management strategies, thereby improving resource-use efficiency and yields. The results underscore the importance of multiscale spectral analysis, particularly at the canopy scale, for detecting early signs of stress and facilitating targeted interventions to enhance crop productivity.

4 CONCLUSIONS

This study demonstrated that FDA significantly improved the interpretation of hyperspectral data for the early classification of sugarcane productivity. By transforming raw spectral measurements into continuous functions, FDA enabled the detection of subtle but statistically significant differences in reflectance, particularly in the NIR region.

Canopy-scale reflectance data provided the greatest discriminatory power between high- and low-productivity plots at both the early (2.5 months) and mid-growth (5.5 months) stages. These differences were con-

sistent with known physiological indicators, such as leaf area index and biomass accumulation, which were more pronounced in high-productivity plots. In contrast, leaf-scale reflectance spectra were less effective, showing limited sensitivity to differences in productivity and fewer spectral regions with statistically significant differences.

The functional *t*-test consistently identified the canopy NIR region as a key diagnostic zone, whereas the leaf-scale approach showed limited utility under open-field conditions because leaf-level measurements are more sensitive to exogenous measurement artifacts (e.g., variable ambient illumination, bidirectional reflectance effects, and background and canopy scattering) that can mask subtle physiological signals. These findings suggest that integrating FDA with canopy-scale hyperspectral reflectance provides a robust, nondestructive approach to early-stage yield assessment in sugarcane.

This method supports precision agriculture by facilitating timely, site-specific decisions related to irrigation, fertilization, and stress management. Future research should focus on combining FDA with machine learning algorithms and expanding its application across different sugarcane varieties and agroecological zones.

As a corollary, the FDA-derived functional mean curve serves as a relative standard hyperspectral reflectance spectrum for each productivity class under the specific agroecological and management conditions evaluated. In this study, the standard spectra are defined by class-specific functional means and their associated variability envelopes, with the most stable and diagnostically informative separation occurring in the canopy NIR region. However, these standard spectra should be interpreted as context-dependent references rather than universal signatures because their shape and amplitude are expected to vary with the agroecological zone, agronomic practices, crop phenology, nutrient accumulation dynamics, and canopy structural development.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

First author: Methodology, investigation, data analysis, conceptualization, and writing of the original draft.

Second author: Investigation, conceptualization, data analysis, and writing of the original draft.

Third author: Data analysis, review, and editing of the final version of the manuscript.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors thank Universidad del Valle, Cenicaña, and the Incauca sugar mill for their invaluable support throughout this research.

FUNDING

This research was supported by Universidad del Valle, Cenicaña, and the Incauca sugar mill through Research Project CI-2961.

USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Not applicable.

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare no conflicts of interest.

REFERENCES

Arruda, D. C. de, Ducati, J. R., Pithan, P. A., Thum, A. B., & Hoff, R. (2024). Hyperspectral data analysis for chlorophyll content derivation in vineyards. *Ciência Rural, 54*(7), Article e20220558. https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20220558

Benavides-Bolaños, J. A., Echeverri-Sánchez, A. F., Reyes-Trujillo, A., del Mar Carreño-Sánchez, M., Jaramillo-Llorente, M. F., & Rivera-Caicedo, J. P. (2025). In situ hyperspectral reflectance sensing for mixed water quality monitoring: Insights from the RUT agricultural irrigation district. *Water, 17*(9), Article 1353. https://doi.org/10.3390/w17091353

Carbonell González, J. A., Quintero Durán, R., Torres Aguas, J. S., Osorio Murillo, C. A., Isaacs Echeverri, C. H., & Victoria Kafure, J. I. (2011). *Zonificación agroecológica para el cultivo de la caña de azúcar en el valle del río Cauca (cuarta aproximación). Principios metodológicos y aplicaciones* (Serie Técnica No. 38). Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia.

Carter, G. A., & Knapp, A. K. (2001). Leaf optical properties in higher plants: Linking spectral characteristics to stress and chlorophyll concentration. *American Journal of Botany, 88*(4), 677–684. https://doi.org/10.2307/2657068

Chanchí-Golondrino, G. E., Ospina-Alarcón, M. A., & Saba, M. (2024). Fourier analysis for detecting vegetation in hyperspectral images. *Ingeniería y Competitividad, 26*(3), Article e-21013493. https://doi.org/10.25100/iyc.v26i3.13493

Coffey, N., & Hinde, J. (2011). Analyzing time-course microarray data using functional data analysis: A review. *Statistical Applications in Genetics and Molecular Biology, 10*(1), Article 23. https://doi.org/10.2202/1544-6115.1671

Corrêdo, L. P., Wei, M. C. F., Ferraz, M. N., & Molin, J. P. (2021). Near-infrared spectroscopy as a tool for monitoring the spatial variability of sugarcane quality in the fields. *Biosystems Engineering, 206*, 150–161. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.04.001

de Lima, I. P., Jorge, R. G., & de Lima, J. L. M. P. (2021). Remote sensing monitoring of rice fields: Towards assessing water saving irrigation management practices. *Frontiers in Remote Sensing, 2*, Article 762093. https://doi.org/10.3389/frsen.2021.762093

El-Hendawy, S., Al-Suhaibani, N., Hassan, W., Tahir, M., & Schmidhalter, U. (2017). Hyperspectral reflectance sensing to assess the growth and photosynthetic properties of wheat cultivars exposed to different irrigation rates in an irrigated arid region. *PLOS ONE, 12*(8), Article e0183262. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0183262

Eubank, R. L. (1999). *Nonparametric regression and spline smoothing* (2nd ed.). CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781482273144

Gai, J., Wang, J., Xie, S., Xiang, L., & Wang, Z. (2024). Spectroscopic determination of chlorophyll content in sugarcane leaves for drought stress detection. *Precision Agriculture, 25*(2), 543–569. https://doi.org/10.1007/s11119-023-10082-0

Gamon, J. A., Peñuelas, J., & Field, C. B. (1992). A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. *Remote Sensing of Environment, 41*(1), 35–44. https://doi.org/10.1016/0034-4257(92)90059-S

Grygar, T. M., Radojičić, U., Pavlů, I., Greven, S., Nešlehová, J. G., Tůmová, Š., & Hron, K. (2024). Exploratory functional data analysis of multivariate densities for the identification of agricultural soil contamination by risk elements. *Journal of Geochemical Exploration, 259*, Article 107416. https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2024.107416

Holzman, M. E., Rivas, R. E., & Bayala, M. I. (2021). Relationship between TIR and NIR-SWIR as indicator of vegetation water availability. *Remote Sensing, 13*(17), Article 3371. https://doi.org/10.3390/rs13173371

Jin, X., Shi, C., Yu, C. Y., Yamada, T., & Sacks, E. J. (2017). Determination of leaf water content by visible and near-infrared spectrometry and multivariate calibration in *Miscanthus*. *Frontiers in Plant Science, 8*, Article 721. https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00721

Katsoulas, N., Elvanidi, A., Ferentinos, K. P., Kacira, M., Bartzanas, T., & Kittas, C. (2016). Crop reflectance monitoring as a tool for water stress detection in greenhouses: A review. *Biosystems Engineering, 151*, 374–398. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.10.003

Kumar, N., Rana, L., Singh, A. K., Pramanick, B., Gaber, A., Alsuhaibani, A. M., Skalicky, M., & Hossain, A. (2023). Precise macronutrient application can improve cane yield and nutrient uptake in widely spaced plant-ratoon cycles in the Indo-Gangetic plains of India. *Frontiers in Sustainable Food Systems, 7*, Article 1223881. https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1223881

Leal Junior, G. A., Romano, T., Pereira, G. S., Lavres Junior, J., Figueira, A., & Bespalhok Filho, J. C. (2025). Nitrogen uptake and physiological use efficiency in Brazilian sugarcane (*Saccharum* × spp.) cultivars: A gist of current understanding. *South African Journal of Botany, 178*, 101–112. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2025.01.014

Lepine, L. C., Ollinger, S. V., Ouimette, A. P., & Martin, M. E. (2016). Examining spectral reflectance features related to foliar nitrogen in forests: Implications for broad-scale nitrogen mapping. *Remote Sensing of Environment, 173*, 174–186. https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.11.028

Li, H., Di, L., Zhang, C., Lin, L., Guo, L., Zhao, H., Guo, C., & Hong, R. (2023). A review of remote sensing in sugarcane mapping. In *2023 11th International Conference on Agro-Geoinformatics (Agro-Geoinformatics)* (pp. 1–5). IEEE. https://doi.org/10.1109/Agro-Geoinformatics59224.2023.10233506

Liu, B., Fernandez, M. A., Liu, T. M., & Ding, S. (2024). Investigation of using hyperspectral vegetation indices to assess *Brassica* downy mildew. *Sensors, 24*(6), Article 1916. https://doi.org/10.3390/s24061916

Martins, J. A., Fiorio, P. R., Silva, C. A. A. C., Demattê, J. A. M., & Barros, P. P. da S. (2024). Application of vegetative indices for leaf nitrogen estimation in sugarcane using hyperspectral data. *Sugar Tech, 26*(1), 160–170. https://doi.org/10.1007/s12355-023-01329-1

Matsui, H., & Mochida, K. (2024). Functional data analysis-based yield modeling in year-round crop cultivation. *Horticulture Research, 11*(7), Article uhae144. https://doi.org/10.1093/hr/uhae144

Nakamura, Y., Tsujimoto, K., Ogawa, T., Noda, H. M., & Hikosaka, K. (2024). Correction of photochemical reflectance index (PRI) by optical indices to predict non-photochemical quenching (NPQ) across various species. *Remote Sensing of Environment, 305*, Article 114062. https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114062

OECD/FAO. (2021). *OECD-FAO agricultural outlook 2021–2030*. OECD Publishing. https://doi.org/10.1787/19428846-en

Oliveira, M. R., Ribeiro, S., Mas, J.-F., & Teixeira, A. (2020). Advances in hyperspectral sensing in agriculture: A review. *Revista Ciência Agronômica, 51*, Article e20207739. https://doi.org/10.5935/1806-6690.20200096

Peñuelas, J., Gamon, J. A., Fredeen, A. L., Merino, J., & Field, C. B. (1994). Reflectance indices associated with physiological changes in nitrogen- and water-limited sunflower leaves. *Remote Sensing of*

Environment, 48(2), 135–146. https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)90136-8

Quemada, C., Pérez-Escudero, J. M., Gonzalo, R., Ederra, I., Santesteban, L. G., Torres, N., & Iriarte, J. C. (2021). Remote sensing for plant water content monitoring: A review. *Remote Sensing, 13*(11), Article 2088. https://doi.org/10.3390/rs13112088

Rahman, M. M., & Robson, A. J. (2016). A novel approach for sugarcane yield prediction using Landsat time series imagery: A case study on Bundaberg region. *Advances in Remote Sensing, 5*(2), 93–102. https://doi.org/10.4236/ars.2016.52008

Ramsay, J. O., & Dalzell, C. J. (1991). Some tools for functional data analysis. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological), 53*(3), 539–572. https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1991.tb01844.x

Ramsay, J. O., & Silverman, B. W. (2005). *Functional data analysis* (2nd ed.). Springer. https://doi.org/10.1007/b98888

Reyes-Trujillo, A. (2020). *Bioindicadores espectrales para monitoreo del cultivo de caña de azúcar en condiciones de tensión ambiental por disponibilidad de nitrógeno* [Doctoral dissertation, Universidad del Valle]. Biblioteca Digital Universidad del Valle. https://hdl.handle.net/10893/28406

Reyes-Trujillo, A., Daza-Torres, M. C., Galindez-Jamioy, C. A., Rosero-García, E. E., Muñoz-Arboleda, F., & Solarte-Rodriguez, E. (2021). Estimating canopy nitrogen concentration of sugarcane crop using in situ spectroscopy. *Heliyon, 7*(3), Article e06566. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06566

Rincón-Fonseca, R. I., Velásquez-Hernández, C. A., & Prieto-Ortiz, F. A. (2021). Reducción de ruido espectral en imágenes hiperespectrales mediante la transformada wavelet discreta. *Revista de Investigación, Desarrollo e Innovación, 11*(3), 601–616. https://doi.org/10.19053/20278306.v11.n3.2021.13359

Som-ard, J., Atzberger, C., Izquierdo-Verdiguier, E., Vuolo, F., & Immitzer, M. (2021). Remote sensing applications in sugarcane cultivation: A review. *Remote Sensing, 13*(20), Article 4040. https://doi.org/10.3390/rs13204040

Tang, Z., Jin, Y., Brown, P. H., & Park, M. (2023). Estimation of tomato water status with photochemical reflectance index and machine learning: Assessment from proximal sensors and UAV imagery. *Frontiers in Plant Science, 14*, Article 1057733. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1057733

Tavares, C. J., Ribeiro Junior, W. Q., Ramos, M. L. G., Pereira, L. F., Muller, O., Casari, R. A. d. C. N., de Sousa, C. A. F., & da Silva, A. R. (2023). Water stress alters physiological, spectral, and agronomic indexes of wheat genotypes. *Plants, 12*(20), Article 3571. https://doi.org/10.3390/plants12203571

Ullah, S., & Finch, C. F. (2013). Applications of functional data analysis: A systematic review. *BMC Medical Research Methodology, 13*, Article 43. https://doi.org/10.1186/1471-2288-13-43

Ungureanu, N., Vlăduț, V., & Biriș, S.-Ș. (2022). Sustainable valorization of waste and by-products from sugarcane processing. *Sustainability, 14*(17), Article 11089. https://doi.org/10.3390/su141711089

Vélez, S., Rançon, F., Barajas, E., Brunel, G., Rubio, J. A., & Tisseyre, B. (2022). Potential of functional analysis applied to Sentinel-2 time-series to assess relevant agronomic parameters at the within-field level in viticulture. *Computers and Electronics in Agriculture, 194*, Article 106726. https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.106726

Viveros Valens, C. A. (Ed.). (2018). *Características agronómicas y de productividad de la variedad Cenicaña Colombia (CC) 01-1940* (Serie Técnica No. 40). Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia. https://www.cenicana.org/pdf_privado/serie_tecnica/st_40/st_40.pdf

Voora, V., Bermúdez, S., Le, H., Larrea, C., & Luna, E. (2023). *Global market report: Sugar cane prices and sustainability*. International Institute for Sustainable Development. https://www.iisd.org/publications/report/2023-global-market-report-sugar-cane

Zhang, H., Feng, S., Wu, D., Zhao, C., Liu, X., Zhou, Y., Wang, S., Deng, H., & Zheng, S. (2024). Hyperspectral image classification on large-scale agricultural crops: The Heilongjiang benchmark dataset, validation procedure, and baseline results. *Remote Sensing, 16*(3), Article 478. https://doi.org/10.3390/rs16030478

Zhang, K., Li, W., Li, H., Luo, Y., Li, Z., Wang, X., & Chen, X. (2023). A leaf-patchable reflectance meter for in situ continuous monitoring of chlorophyll content. *Advanced Science, 10*(35), Article 2305552. https://doi.org/10.1002/advs.202305552

Conflicto de intereses
Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Licencia de Creative Commons
Revista de Investigación Agraria y Ambiental is licensed under a Creative Commons Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual 4.0 Internacional License.

INSTRUCCIONES PARA AUTORES

La **Revista de Investigación Agraria y Ambiental (RIAA)** es una publicación oficial de la Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente (ECAPMA) de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), destinada a publicar artículos resultado de las investigaciones originales en el área agraria y ambiental y áreas de conocimiento afines.

La Revista de Investigación Agraria y Ambiental (RIAA) y su misión en ser divulgadores de la investigación en áreas agrarias y las otras ciencias involucradas en las que se abarcan en todas las disciplinas dentro de las áreas de las ciencias agrarias y ambientales (OCDE) a través de artículos de artículos de investigación y artículos de revisión resultantes del trabajo de los investigadores nacionales e internacionales.

Proceso de arbitraje de manuscritos. La recepción formal de artículos se hará única y exclusivamente a través de la plataforma de gestión editorial de la revista, Open Journal System – OJS (http://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/index).

Nota: aquellos manuscritos que sean remitidos al correo electrónico no serán considerados para iniciar el proceso editorial.

El equipo de gestión editorial realiza la verificación inicial a los manuscritos postulados y revisa que estén orientados a las temáticas de RIAA y conforme a las normas de la publicación. Aquellos que no cumplan con la lista de chequeo inicial serán devueltos al autor.

Los artículos que acaten los lineamientos editoriales establecidos por la revista iniciarán la fase de asignación de revisores. El equipo editorial seleccionará expertos en el tema para que evalúe el manuscrito bajo la modalidad de doble ciego. Estos expertos serán académicos, especialistas o árbitros ad hoc de reconocida credibilidad en el ámbito nacional y/o internacional. Los revisores dictaminarán sobre originalidad, relevancia, pertinencia y contenido y registrarán su decisión en el Formato para concepto de evaluación. En caso de obtener evaluaciones positivas, se le notificará al autor para que incorpore dichas observaciones y continúe dentro del proceso editorial.

Una vez adaptado el artículo, el autor deberá remitirlo nuevamente al equipo editorial, dentro de los plazos establecidos para ello, junto con una comunicación especificando las modificaciones efectuadas y cuáles no, indicando los motivos de la negativa. En caso de que un artículo obtenga un concepto favorable y otro desfavorable, será un integrante el comité editorial y/o científico el encargado de dirimir cualquier controversia y cuyo concepto y recomendación editorial será definitiva. Las decisiones del Comité Editorial son inapelables.

Las correcciones ortográficas en el texto son hechas directamente por el equipo editorial de la revista, sin consultar a los autores, además tiene la autonomía de revisar el documento y compararlo con softwares anti-plagio con miras de asegurar la originalidad del manuscrito, luego de este proceso, el comité emitirá observaciones que el autor debe acatar previo a la evaluación por pares. Sin embargo, una versión final antes de impresión y/o publicación en la página web de la RIAA será enviada a los autores para su aprobación. Se considera que la versión final es aceptada si el autor no responde en los tiempos estimados.

La recepción de un manuscrito no obliga a la publicación del mismo. La revisión de los manuscritos se hará respetando el derecho de los autores a la confidencialidad en cuanto a la información, resultados y esfuerzo creativo. Así mismo, se respetará el derecho a la confidencialidad de los revisores y editores.

Política de acceso libre

RIAA proporciona acceso público y gratuito a todo su contenido con el fin de promover un mayor intercambio global del conocimiento y fomentar la lectura y citación de los originales publicados. RIAA no tolera ninguna forma de plagio (total, parcial o conceptual). En caso de

dentificar algún plagio, además de informar al autor el retiro del artículo, buscará advertir a los autores plagiados. RIAA se acoge a lo establecido en la política de plagio de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD).

Periocidad

RIAA es una publicación semestral (enero-junio y julio-diciembre).

Idioma

Los manuscritos enviados pueden estar escritos en español o inglés.

Tipología de manuscritos La RIAA admite las siguientes tipologías de artículos:

Artículo de investigación: se asocia a la divulgación de productos de investigación en sentido estricto. Su estructura debe contar con:

- Introducción
- Materiales Y Métodos
- Resultados y Discusión
- Conclusiones
- Agradecimientos
- Literatura citada

Artículo de revisión: es la sistematización, análisis y balance de lo investigado sobre un problema en particular y tiene por objeto dar cuenta de sus referentes conceptuales, metodológicos y epistemológicos, además de los avances y tendencias del campo investigado. Se caracteriza por presentar una cuidadosa revisión analítica de por lo menos 50 referencias bibliográficas. Un 60% de la literatura citada debe provenir de investigaciones publicadas en los últimos 4 años.

La estructura que se propone es:

- Introducción
- Planteamiento de la temática
- Recuperación Bibliográfica (en forma de tablas, pictogramas, mapas conceptuales entre otros)
- Discusión Ge Oos Kallazgos
- Conclusiones
- Agradecimientos
- Literatura citada

La postulación formal de los artículos de revisión estará sujeta al previo análisis y verificación de la temática y pertinencia del asunto abordado por parte del equipo editorial. En ese sentido, la carta para la solicitud de publicación del artículo de revisión se recibirá de manera inicial a través del correo electrónico de la revista y una vez cuente con el respectivo aval de los editores, se le solicitará al autor realizar envío a través de OJS para el respectivo proceso editorial.

Remisión del manuscrito

Como parte del proceso de envío, los autores están obligados a comprobar que su envío cumpla todos los elementos que se muestran a continuación. Se devolverán a los autores aquellos envíos que no cumplan estas directrices.

La Revista de Investigación Agraria y Ambiental se acoge a la cultura de la originalidad para el desarrollo de la producción intelectual de la institución y por esta razón todos los artículos postulados serán sometidos a verificación con la herramienta **Turnitin**. En caso que el informe arroje un % de similitud superior al 30% y no derivarse de un trabajo de grado o tesis de postgrado, el equipo editorial tendrá la autonomía de retirar el artículo del proceso editorial.

Lista de comprobación inicial:

1. El manuscrito es inédito, no se ha publicado previamente, ni está siendo postulado simultáneamente a otra publicación.
2. Cumple con los lineamientos establecidos en las Instrucciones para Autores.
3. Se emplea la plantilla diseñada para la presentación de manuscritos.
4. Se han registrado todos los autores en el envío. Este paso es indispensable para evitar retrasos posteriores en el proceso, edición y publicación del artículo.
5. En el apartado "Comentarios para el editor" tendrá la opción de sugerir 3 posibles evaluadores, con su respectivo nombre, afiliación institucional y correo electrónico.
6. Citas y referencias redactadas según estilo APA.
7. Emplea tesauros para la construcción de palabras clave.

Formato general del documento

- Documento en formato Word
- Tamaño de papel carta (21.5 x 27.9 cm) y márgenes 3 cm superior, 2.5 cm izquierda, 3 cm inferior y 2 cm derecha, a una sola columna.
- Tipo de letra Verdana, tamaño 10.
- Espacio interlinear de 1.15 cm.
- Se recomienda que la extensión de los manuscritos postulados para publicación no exceda las 4000 palabras (incluyendo tablas, figuras y literatura citada), y hasta 6000 palabras para los artículos de revisión (incluyendo tablas, figuras y literatura citada).
- Si tiene figuras que ocupen una página completa (dos cuartillas), le recomendamos que lo coloque como anexo al documento. Esta figura quedará enlazada en el espacio web donde se alojará su artículo y en el caso de la versión impresa se maneja con código QR.

Título y autores

El titulo no debe exceder 15 palabras. Debe describir el contenido del artículo de manera clara y concisa, evitando el uso de palabras ambiguas, abreviaturas y signos de interrogación y exclamación.

Para cada uno de los autores que aparecen en el encabezado se debe proporcionar: nombre completo, último título académico obtenido o estudios actuales, filiación institucional, ciudad y país, correo electrónico. Omita cargos, grados docentes, nombres de grupo de investigación, reconocimientos, etc.

Resumen

El resumen identifica el objetivo y expone de manera breve la metodología, los resultados y las conclusiones del estudio. No deberá exceder las 250 palabras, tampoco incluir citas bibliográficas o abreviaturas, excepto aquellas que sean ampliamente conocidas. Según sea el idioma original del manuscrito deberá incluirlo en un segundo idioma (inglés y español).

Palabras clave

Se sugiere emplear una lista de cuatro a siete palabras, presentadas en orden alfabético y separadas por punto y coma (;).

No repita palabras que se encuentren en el título. Evite el uso de palabras en plural y frases. Idealmente emplee palabras normalizadas o descriptores del tesauro AGROVOC, UNESCO y que sean aceptadas por bases de datos internacionales.

Resumen gráfico

Es una representación concisa y visual de los principales hallazgos de la investigación. Deberá permitir al lector comprender rápidamente la esencia del artículo e incentivar su lectura.

Será requisito que todos los artículos aceptados incluyan esta imagen.

Tablas y figuras

Las tablas deben explicarse por sí solas y no duplican lo planteado en el texto, sino que lo sustituyen o complementan.

Dentro del texto refiérase a la tabla de la siguiente forma, (Tabla 1). Presente los datos en una tabla real sin líneas y columnas, a espacio sencillo, sin divisiones verticales ni divisiones internas. Se deben utilizar unidades del Sistema Internacional (SI). Las abreviaturas y acrónimos deben ser explicados como notas al pie en cada tabla. En ningún caso se admitirán tablas en formato apaisado.

Un ejemplo de la presentación de una tabla es:

Tabla 1. Ejemplo de la presentación de una tabla

Número de la muestra	Nombre	Apellido	Departamento
M1	Milton	Rodríguez	Cundinamarca
M2	Alberto	Ruiz	Cundinamarca
M3	Ricardo	Cadena	Cundinamarca

Fuente de consulta: *adaptado de: XXXXX.*

Dentro de la categoría de figuras se incluyen gráficos, imágenes, fotos, y cada una de ellas debe tener su correspondiente leyenda y fuente, en caso de ser de su propia autoría mencionarlo. Las abreviaturas y acrónimos deben ser explicados en la leyenda

de la figura. Las figuras deben ser enviadas en formato .jpg .gif o .png y deben tener la calidad necesaria para su publicación (más de 1024pixeles). Un ejemplo de figura:

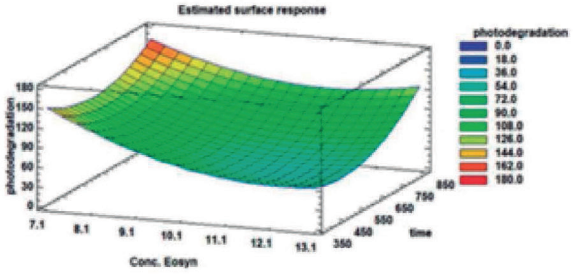


Figura 1. Título de la figura. Leyenda de la figura, el tipo de letra verdana tamaño 9.

Fuente de: *xxxxxx*

Ecuaciones

Todas las ecuaciones se enumeran al lado de la misma de la forma ecuación 1 citadas en el texto como (ecuación 1). Las ecuaciones se sugieren que se desarrollen en el editor de ecuaciones de Microsoft Word o a través de la aplicación de Mathtype.

Contribución de la autoría

En esta sección se explica cuál fue la contribución de cada autor al artículo. Ejemplo: Primer autor: Metodología, investigación, análisis de datos, conceptualización, escritura – borrador original. Segundo autor: Investigación, conceptualización, análisis de datos, escritura – revisión y edición. Tercer autor: Logística, revisión y edición. Cuarto autor: análisis de datos, revisión y edición. Quinto autor: Adquisición de recursos, administrador del proyecto, supervisión, conceptualización, escritura – revisión y edición.

Agradecimientos

Esta sección se utilizará para hacer un reconocimiento a aquellas personas o instituciones que han hecho contribuciones sustanciales al trabajo o han prestado asistencia en la investigación (técnica, financiera, logística, intelectual, entre otras.). Los agradecimientos deben ir como una sección separada después de la discusión y antes de las referencias. Se incluye aquí, las referencias de los proyectos que hicieron posible el estudio.

Literatura citada

Deberán incluirse todas aquellas fuentes o autores que fueron citados en el cuerpo del documento. Nunca deberá referenciarse un autor que no haya sido citado y viceversa. Tenga en cuenta que no se admitirán artículos sin referencias. Un 60% de las citas debe provenir de investigaciones publicadas en los últimos 10 años.

Esta lista se organiza en orden alfabético y sin enumerar, y cada una debe tener sangría francesa. Para la referenciación de números o volúmenes de alguna publicación usar números arábigos y no romanos.

Forma básica:

Apellido, A.A., Apellido, B.B., y Apellido, C. C. (Año). Título del artículo. Nombre de la revista, volumen (número), pp-pp.

Solo utilice fuentes electrónicas que correspondan a publicaciones con respaldo institucional, cuyo contenido no pueda ser modificado o eliminado en el futuro. No utilice información proveniente de páginas comerciales o sitios de opinión.

El formato de la literatura citada debe seguir la normas APA, en cuanto a citación de artículos científicos, libros, capítulos de libro, páginas Web, tesis de doctorado, maestría y pregrado, informes, reportes, etc.

Anexos

Si tiene figuras que ocupen una página completa (dos cuartillas) o información adicional relevante del estudio, pero que por su extensión no es posible situarla en el texto principal, le recomendamos que lo coloque como anexo al documento (Anexo 1, Anexo 2, etc.). Esta figura quedará enlazada en el espacio web donde se alojará su artículo y en el caso de la versión impresa se maneja con código QR.

*** Se sugiere que los autores usen la plantilla diseñada para los artículos presentados a la revista:

https://hemeroteca.unad.edu.co/ index.php/riaa/about/submissions ***

GUIDE FOR AUTHORS

The Journal of Agrarian and Environmental Research (RIAA) is an official publication of the School of Agricultural, Livestock and Environment Sciences (ECAPMA) of the National Open and Distance University (UNAD), destined to publish articles resulting from the original investigations in the agrarian and environmental area and related areas of knowledge in animal production, agriculture and sustainable use of natural resources. As examples of related areas, mention, among others, Ethics, Ecology, Sociology, Geography, History, Law and Economics, when dealing with perspectives of development, styles of agriculture, agrarian history, development sustainable, of environmental ethics, of agrarian and environmental policy, environmental, forestry and agrarian legislation or of significant and innovative contributions with a systemic, interdisciplinary and / or transdisciplinary vision.

The mission of RIAA is to promote communication and collaboration between national and international researchers through the dissemination and transfer of knowledge related to agricultural sciences and the environment, to strengthen the generation of new knowledge. The subjects in which RIAA publishes its research products are:

1. Agroecology and sustainable production models
2. Animal physiology and nutrition
3. Ethology and animal welfare
4. Land use and management
5. Principles and strategies of environmental management
6. Rural development, Education and Social projection
7. Biotechnology and alternative energies
8. Agroforestry systems, agroforestry, agrobiodiversity
9. Clean technologies
10. Integral management of solid waste
11. Environmental Modeling and risk management
12. Climate change
13. Diagnosis and pollution control
14. Animal and environmental ethics
15. Alternative processes for water treatment.

Article arbitration process

The editor receives the postulated manuscripts for publication and reviews that are oriented to the RIAA themes and in accordance with the publication rules. After this, the originals pass to the Editorial Committee for the appointment of external peers. All originals are submitted to arbitration in the double-blind modality, at least two pairs, which must be academics, specialists or *ad hoc* arbitrators. According to the opinion of the peers (which is recorded in the format for evaluation concept), the authors are requested or not to make major or minor modifications and the adaptation of the originals to the editorial policy of the journal.

In the event that a document presents a favorable and unfavorable concept, it will be sent to a third evaluator whose opinion will be final, with the Editorial Committee in charge of resolving any dispute that may arise with respect to the evaluations, and it is the instance that decides which articles will be published, the decisions of the Editorial Committee are unappealable.

The orthographic corrections in the text are made directly by the editorial Committee of the journal, without consulting the authors, it also has the autonomy to review the document and compare it with anti-plagiarism software in order to ensure the originality of the manuscript, after this process, the committee will issue observations that the author must comply with prior to the peer evaluation.

However, a final version prior to printing and / or publi- cation on the RIAA website will be sent to the authors for approval. It is considered that the final version is accepted if the author does not respond in the estimated times.

The reception of a manuscript does not oblige the publication thereof. The revision of the manuscripts will be done respecting the right of the authors to the confidentiality regarding the information, results and creative effort. Likewise, the right to confidentiality of reviewers and editors will be respected.

Remission of the manuscript

As part of the submission process, authors are required to verify that their submission meets all the elements shown below. Authors who do not comply with these guidelines will be returned to the authors.

Initial checklist:

1. The manuscript is unpublished, it has not been previously published, nor is it being simultaneously submitted to another publication.
2. It complies with the guidelines established in the Instructions for Authors.
3. The template designed for the presentation of manuscripts is used.
4. All authors have been registered in the shipment. This step is essential to avoid further delays in the process, editing and publication of the article.
5. SUGGEST 5 POSSIBLE EVALUATORS with their respective name, affiliation and email. Add the data in the box called "Comments for the EDITOR". If you wish, you can mention the possible evaluators with whom you have a conflict of interest and who do not want you to review your manuscript.
6. references written according to APA style.
7. Use thesauri for the construction of keywords.

Free Access policy

RIAA provides free public access to all its content to promote a greater global exchange of knowledge and encourage the reading and citation of published originals. RIAA does not tolerate any form of plagiarism (total, partial or conceptual). In case of identifying any plagiarism, in addition to informing the author of the withdrawal of the article, it will seek to warn the plagiarized authors. RIAA accepts the provisions of the plagiarism policy of the National Open and Distance University (UNAD).

Frequency

RIAA is a biannual publication (January-June and July-December).

Language

Submitted manuscripts may be written in Spanish or English.

Postulation of manuscripts

The RIAA has several types of articles:

- Research Articles
- Review articles

Research articles are associated with the dissemination of research products in the strict sense. This manuscript format should have: introduction, materials and methods (experimental design and statsitsical analysis), results and discussion, conclusions, acknowledments, author contributions and cited Literature.

On the other hand, ***the review article*** is the systematization, analysis and balance of the research on a problem and aims to account for their conceptual, methodological and epistemological references, in addition to the advances and trends of the field investigated. It is characterized by presenting a careful analytical review of at least 50 bibliographical references. 60% of the cited literature must come from research published in the last 4 years. The structure that must have is: introduction, approach of the subject, standard bibliographic review (in the form of tables, pictograms, conceptual maps among others.), discussion of the findings, conclusions, acknowledgments and literature cited.

General format of the document

Document in Word format. Letter paper size (21.5 x 27.9 cm); margins 3 cm upper, 2.5 cm left, 3 cm lower and 2 cm right, to a column. Font Verdana, size 10.Interlinear space of 1.5.

It is recommended that the extension of manuscripts postulated for publication does not exceed 4000 words (including tables, figures and literature cited); 6000 words for review articles.

If you have figures that occupy a complete page (two pages), we recommend that you place it as an annex to the document. This figure will be linked in the web space where your article will be housed and in the case of the printed version, it will be handled with a QR code.

Titles and authors

The title must not exceed 15 words. You must describe the content of the article clearly and concisely, avoiding the use of ambiguous words, abbreviations and question marks and exclamation marks.

For each of the authors that appear in the header, you must provide: full name, last academic degree obtained or current studies, institutional affiliation, city and country, email. Omit charges, teaching degrees, research group names, recognitions, etc.

Tables and figures

The tables must be explained by themselves and do not duplicate what is stated in the text, but replace or complement it.

Within the text refer to the table as follows: (Table 1). Present the data in a real table without lines and columns, in single space, without vertical divisions or internal divisions. International System (SI) units must be used. Abbreviations and acronyms should be explained as footnotes in each table. In no case will tables be allowed in landscape format. An example of the presentation of a table is:

Table 1. Example of the presentation of a table

Number of the sample	Name	surname	Providence
M1	Milton	Rodríguez	Cundinamarca
M2	Alberto	Ruiz	Cundinamarca
M3	Ricardo	Cadena	Cundinamarca

Source: xxxxx

Within the category of figures include graphics, images, photos, and each one of them must have its corresponding legend and source, in case it is of its own authorship to mention it. The abbreviations and acronyms must be explained in the legend of the figure. The figures must be sent in .jpg .gif or .png format and must have the necessary quality for publication (more than 1024pixels).

Equations

All the equations are listed next to it in the equation form 1 cited in the text as (equation 1). The equations are suggested to be developed in the Microsoft Word equation editor or through the Mathtype application.

References and bibliographical citations

All those sources or authors that were cited in the body of the document should be included. An author who has not been cited must never be referenced and vice versa. Keep in mind that articles without references will not be accepted. 60% of citations must come from research published in the last 10 years.

This list is organized in alphabetical order and without enumeration, and each one must have French indentation. For the reference of numbers or volumes of some publication, use Arabic and non-Roman numerals.

Basic form:

Surname, A.A., Surname, B.B., and Surname, C. C. (Year). Article title. *Name of the journal, volume* (number), ##-##.

Only use electronic sources that correspond to publications with institutional support, whose content can not be modified or eliminated in the future. Do not use information from commercial pages or opinion sites.

Format of the cited literature must follow the APA standards, in terms of citation of scientific articles, books, book chapters, Web pages, doctoral, master and undergraduate theses, reports, reports, etc.

Annexes

If you have figures that occupy a full page or additional relevant information from the study, but due to their length it is not possible to place it in the main text, we recommend to place this information as an annex to the document (Annex 1, Annex 2, etc.). This information will be linked to the web space, where your article will be hosted and, in the case of the printed version, it is managed with code QR.

*** It is suggested that the authors use the template designed for the articles submitted to the magazine:
https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/about/submissions