

REVISTA

U.D.C.A

ACTUALIDAD & DIVULGACIÓN CIENTÍFICA

Revista Científica | ISSN: 2619-2551 (en línea) ISSN: 0123-4226 (impreso) | enero - junio 2025 | Volumen 28 No. 1 D.L. | Bogotá, D.C. - Colombia



Autor fotografía: Fabián Ramírez (Caquetaia kraussii)

PUBLICACIÓN OFICIAL DE LA UNIVERSIDAD
DE CIENCIAS APLICADAS Y AMBIENTALES U.D.C.A,
INSTITUCIÓN CON ACREDITACIÓN DE ALTA CALIDAD



ENFOQUE Y ALCANCE

La Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica es una publicación seriada, multidisciplinar*, arbitrada que adopta la revisión por pares de doble ciego, de acceso abierto vía diamante y de producción continua (Hacer click aquí para ver el proceso de publicación), dirigida a investigadores. Tiene como finalidad evaluar, publicar y difundir la producción científica, principalmente, de la región iberoamericana y de las otras regiones tropicales y subtropicales.

Para facilitar el acceso y la apropiación, se aceptan manuscritos en idiomas español, inglés y portugués. La mayoría de los documentos que publica pertenecen a artículos científicos; sin embargo, también edita artículos de reflexión, de revisión, reporte de casos y notas técnicas.

La revista es editada, sin interrupción, desde 1998 y se encuentra indizada en Scopus, Chemical Abstracts, CAB Abstracts, Índice Bibliográfico Nacional Publindex clasificada en "B" Convocatoria No. 910 de 2021, SciELO Colombia, Reseñada en Latindex e incluida en la base de datos Periódica UNAM, México, en el Directory of Open Access Journals-DOAJ y en la Red Iberoamericana de Innovación y Conocimiento Científico-REDIB.

La gratuidad para el autor y el lector obedece a la financiación de la revista por parte de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A y a la colaboración desinteresada de los evaluadores externos.

*Temas abordados: Ciencias Agrarias, Ciencias Naturales y Ciencias Sociales.

FOCUS AND SCOPE

The "Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica", is a serial, multidisciplinary*, refereed publication that adopts double-blind peer review, diamond open-access and continuously produced publication (Click here to know the publication process), aimed at researchers. Its purpose is to evaluate, publish and disseminate scientific production, mainly from the Ibero-American region, but also from the others tropical and subtropical regions.

To extend the dissemination of articles and facilitate access and appropriation, manuscripts in Spanish, English or Portuguese are accepted. Most of the documents published belong to scientific articles, however, it also publishes articles of reflection, reviews, case reports and technical notes.

The journal has been edited, without interruption, since 1998 and is indexed in Scopus, Chemical Abstracts, CAB Abstract, Publindex National Bibliographic Index classified in "B" Announcement No. 910 of 2021, SciELO Colombia, Review in Latindex and included in the database Periodica UNAM, Mexico, in the Directory of Open Access Journals-DOAJ, and in the Red Iberoamericana de Innovación y Conocimiento Científico-REDIB.

The not charges for the publication to the authors and the free access to the readers obey to the financing of the Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales and the disinterested collaboration of the peer reviewers.

*Topics covered: Agricultural Sciences, Natural Sciences and Social Sciences.

FOCO E ESCOPO

A Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica é uma revista multidisciplinar* que avalia, publica e divulga a produção científica da região ibero-americana, utilizando o sistema de avaliação duplo-cega e adotando o sistema de acesso aberto via diamante (Clique aqui para saber mais sobre o processo de publicação).

Com o propósito de facilitar o acesso e a apropriação da produção científica produzido por e para a região, a revista publica os artigos em espanhol, inglês e português. A gratuidade para o autor, como para o leitor, deve-se ao apoio financeiro da Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales e a colaboração desinteressada dos avaliadores externos.

A revista tem uma trajetória de mais de 20 anos e se encontra indexada no Scopus, Chemical Abstracts, CAB Abstract, Índice Bibliográfico Nacional Publindex classificada em "B" anuncio No.910 de 2021, SciELO Colombia, revisada em Latindex e incluída na base de dados Periódica UNAM, México, no the Directory of Open Access Journals-DOAJ, e na Red Iberoamericana de Innovación y Conocimiento Científico-REDIB

A gratuidade para o autor, como para o leitor, deve-se ao apoio financeiro da Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales e a colaboração desinteressada dos avaliadores externos.

*Temas comprendidos: Ciências Agrárias, Ciências Naturais e Ciências Sociais.

EQUIPO EDITORIAL

Editor

Helber Adrián Arévalo Maldonado
Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A
Bogotá, Colombia

Comité editorial

Carlos Alberto Blanco Montero
USDA-Animal and Plant Health Inspection Service APHIS
Washington, Estados Unidos de América

Eduardo José Delgado Hernández
Universidad Experimental de los Llanos Occidentales Ezequiel
Zamora Barinas, Venezuela

Luz Piedad Romero Duque
Jardín Botánico de Medellín
Medellín, Colombia

Marlete Brum Cleff
Universidade Federal de Pelotas UFP
Pelotas, Brasil

Rosângela Brito
Universidade Federal do Rio Grande do Sul UFRGS
Porto Alegre, Brasil

Comité científico

Adriana Posada Arrubla
Investigador Independiente
Bogotá, Colombia

Alfonso Javier García
Universidad de Sevilla
Sevilla, España

Andrea Vasquez García
Universidad Nacional Abierta y a Distancia
Palmira, Colombia

Andrés Franco Herrera
Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano
Santa Marta, Colombia

Cecilia Trillo
Universidad Nacional de Catamarca, CONICET-IRES
Catamarca, Argentina

Clistenes Williams Araújo do Nascimento
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Recife, Brasil

Félix Ignacio Contreras
Universidad Nacional de Catamarca, CONICET-IRES
Corrientes Corrientes, Argentina

Francisco Alonso Solís Marín
Universidad Nacional Autónoma de México
Ciudad de México, México

Galdino Andrade Filho
Universidade Estadual de Londrina
Londrina, Brasil

Jessica Rubiano Moreno
Universidad de San Buenaventura
Bogotá, Colombia

Jesús Muñoz Rojas
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Puebla de Zaragoza, México

Jhon James Mora Rodríguez
Universidad ICESI
Cali, Colombia

José Eleutério Junior
Universidade Federal do Ceará
Ceará, Brasil

José Gregorio Lanza Marchán
Normalización Chile-LAN Consultores
Santiago, Chile

José Siles González
Universidad de Alicante
Alicante, España

Julieta Domínguez Soberanes
Universidad Panamericana
Aguascalientes, México

Laura Barcia Rivera
Universidad de la República
Montevideo, Uruguay

Rita María Ávila G. de Hernández Universidad
Centrooccidental Lisandro Alvarado
Barquisimeto, Venezuela

Samuel Moisés Nucamendi Guillén Universidad
Panamericana
Guadalajara, México

Sandra Quijas Fonseca
Universidad de Guadalajara
Puerto Vallarta, México

Sildivane Valcácia Silva
Universidade Federal da Paraíba
Paraíba, Brasil

Violeta Corona
Universidad Panamericana
Guadalajara, México

Zaidett Barrientos Llosa
Universidad Estatal a Distancia,
San José, Costa Rica

Equipo colaborador

Correctora de estilo y ortográfica
Norella Castro Rojas

Diagramador
Fabian Ernesto Ramírez Cárdenas

CONTENIDO

Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica

Volumen 28 número 1- enero-junio, 2025

<https://doi.org/10.31910/rudca.v28.n1.2025>

EDITORIAL

La investigación, factor fundamental para alcanzar los ODS

Germán Anzola Monteroe2951
<https://doi.org/10.31910/rudca.v28.n1.2025.2951>

CIENCIAS AGRARIAS

Respuesta del cacao (*Theobroma cacao*) clon CCN-51 a la fertilización en condiciones agroclimáticas del Trapecio Amazónico Colombiano
Gelber Rosas-Patiño, Verenice Sánchez-Castillo, Carlos Patiño-Torres.....e2563
<https://doi.org/10.31910/rudca.v28.n1.2025.2563>

Componentes del rendimiento en tres clones de cacao (*Theobroma cacao* L.) bajo fertilización química fraccionada
Danielle Oliveira-de-Andrade, Jaime Torres-Bazurto, Daniel Gerardo Cayón Salinas, Oscar Piamba, Lina María Alvarado, Óscar Darío Hincapié ...e2672
<https://doi.org/10.31910/rudca.v28.n1.2025.2672>

Visual, olfactory, and nutritional stimuli of basil (*Ocimum basilicum* L.) in *Tetragonisca angustula* (Hymenoptera: Apidae)
Julitza M. Fuentes-Polo, Samuel D. Toncel-Pérez, Nataly de-la-Pava-Suarez.....e2654
<https://doi.org/10.31910/rudca.v28.n1.2025.2654>

Actividad antrópica, calidad del suelo y estado de conservación de relictos de bosque seco tropical en Enciso Santander, Colombia
Belcy Viviana Gómez-Pacheco, Cristian Guerrero-Valderrama, Doris Duarte-Hernández, Ricardo Andrés Oviedo-Celis.....e2378
<https://doi.org/10.31910/rudca.v28.n1.2025.2378>

Evaluación del impacto de las aguas residuales del beneficio húmedo del café en Xicotepec, México
Gabriela Pérez-Ororio, Fabiola Avelino-Flores, Betzabe Hernández-Lorenzo, José Eligio Moisés Gutiérrez-Arias, José Carlos Mendoza-Hernández, Yaselda Chavarín-Pinedae2717
<https://doi.org/10.31910/rudca.v28.n1.2025.2717>

Análisis de la producción, características demográficas y socioeconómicas de los productores y campesinos en la zona rural de Medellín
Dennys Herrera-Ramírez, Lina Buelvas-Gutiérrez, Efraín Boom-Cárcamo.....e2418
<https://doi.org/10.31910/rudca.v28.n1.2025.2418>

Uso de aditivos nutraceúticos mejora el desarrollo intestinal y la salud productiva durante el post destete porcino
Jaime A. Angel-Isaza, Tomas A. Madrid-Garcés, Victor Herrera-Franco, Albeiro López-Herrera, Jaime E. Parra-Suescune2556
<https://doi.org/10.31910/rudca.v28.n1.2025.2556>

Diseño de medios de cultivo para el crecimiento de *Lactobacillus pentosus* LB-31 como probiótico para la producción animal
Dailyn Sosa-Cosío, Yaneisy García-Hernández, Julio C. Dustet-Mendoza, Maryen Alberto Vázquez, Nereyda Albelo-Dorta, Dania Ortega-de-la-Paz...e2644
<https://doi.org/10.31910/rudca.v28.n1.2025.2644>

Quantification and characterization of nitrifying bacteria isolated from an aquaponic system
Natalia Naranjo-Robayo, Maribeb Castro-González, Edwin Gómez-Ramírez.....e2653
<https://doi.org/10.31910/rudca.v28.n1.2025.2653>

Influence of the type of packaging and the hydrocolloid addition on the physico-chemical and sensory quality of soursop (*Annona muricata*) juice
Denisse Margothe Zambrano-Muñoz, Jair Alexander González-Burgos, Karol Yannela Revilla-Escobar, Jhonnatan Placido Aldas-Morejón, Roxanna Mercedes Zambrano-Muñoz, Marcos Alberto Avilés-Miño, Damaris Sanchez-Aguilerae2721
<https://doi.org/10.31910/rudca.v28.n1.2025.2721>

Isotermas de adsorción y propiedades termodinámicas en harina de tarwi (*Lupinus mutabilis*)
Santos Martín Briceño-Sevillano, Lubberto Marceliano-Sánchez, Rodolfo Moisés Vegas-Niñoe2540
<https://doi.org/10.31910/rudca.v28.n1.2025.2540>

CIENCIAS NATURALES

Caracterización y percepción de los servicios ecosistémicos de un parque ecoturístico en un ejido del Estado de México, México
Sofía Ochoa-López, Javier Gúzman-Sánchez, Carlos Peralta-Olmedo.....e2633
<https://doi.org/10.31910/rudca.v28.n1.2025.2633>

Assessing the circularity potential of plastics with a substitutability approach: A case study in Argentina
Maria Agustina Zapata, Fernando Arce Bastias, Bárbara Civit, Pablo Arenae2631
<https://doi.org/10.31910/rudca.v28.n1.2025.2631>

Perfil de la contaminación por microplásticos en el agua del Embalse Betania, Departamento del Huila, Colombia
Nestor Alfonso Ramírez-Silva, Jorge Leonardo Muñoz-Yustrez, Angela Goretty García-Gomez.....e2593
<https://doi.org/10.31910/rudca.v28.n1.2025.2593>

Tratamiento bio-oxidativo de percolados provenientes de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos: un seguimiento espectroscópico
Sergio Mauricio Betancur-Hincapié, Isabel Acevedo-Restrepo, Carlos Alberto Peláez-Jaramillo, Nora Restrepo-Sáncheze2722
<https://doi.org/10.31910/rudca.v28.n1.2025.2722>

Áreas verdes y vivienda de interés social: histórico déficit de bienestar ambiental
Martha Lucia Ortiz-Moreno, Clara Inés Caro-Caroe2595
<https://doi.org/10.31910/rudca.v28.n1.2025.2595>

CIENCIAS SOCIALES

La visión desde ninguna parte: páramos y desarrollo sostenible.....e2652
Diana María Acevedo-Zapata
<https://doi.org/10.31910/rudca.v28.n1.2025.2652>

PARES EVALUADORES



La investigación, factor fundamental para alcanzar los ODS

Research, a key factor in achieving the SDGs

Germán Anzola Montero¹ 

¹Rector. Universidad de Ciencias Aplicada y Ambientales U.D.C.A. Bogotá, D.C., Colombia; e-mail: ganzola@udca.edu.co

Como citar: Anzola Montero, G. 2025. La investigación, factor fundamental para alcanzar los ODS. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 28(1):e2951. <http://doi.org/10.31910/rudca.v28.n1.2025.2951>

Artículo de acceso abierto publicado por Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, bajo una licencia Creative Commons CC BY-NC 4.0

Publicación oficial de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Institución de Educación Superior Acreditada de Alta Calidad por el Ministerio de Educación Nacional.

En el mundo, el progreso hacia los Objetivos de Desarrollo Sostenible - ODS está rezagado, puesto que, según el Informe de Desarrollo Sostenible 2024 (Sostenibles.org, 2024), solo el 16 % de las metas está en camino de cumplirse para 2030 y, el resto de las propuestas, siguen estancadas o eludiéndose. Para el caso de América Latina y el Caribe esta situación no es nada alentador, ya que apenas el 23 % de las metas será alcanzado (Cepal, 2025), donde la brecha más crítica, particularmente, se centra en erradicar el hambre, la desigualdad, la educación y el agua potable.

En Colombia, el panorama es igual de deplorable. A pesar de ser uno de los países que tempranamente asumió el compromiso de implementar la Agenda 2030 necesita acelerar el ritmo de acción, en el sentido, de fortalecer los planes nacionales, las políticas públicas, los marcos institucionales y promover una mayor participación ciudadana, es decir, involucrar al sector público, el sector privado, la academia y la sociedad civil.

El papel de las universidades colombianas en el desarrollo sostenible

En las últimas décadas, se acuñaron los términos educación sostenible y desarrollo sostenible, los cuales, han cobrado una relevancia significativa, no solo en el ámbito de la investigación científica en el país sino en las Universidades, puesto que son ellas las que desempeñan un papel crucial en su fomento, con un enfoque que abarca lo social, lo económico, lo cultural, lo científico, que va más allá de implementar un objetivo ambiental, para convertirse en una visión integral, al incorporar la Agenda 2030 en sus políticas institucionales, en sus programas académicos, en sus proyectos investigativos y en sus acciones de extensión.

Una de las principales formas en que las universidades del país contribuyen al desarrollo de los ODS es a través de la investigación científica, en mayor medida y en la investigación formativa, orientada a resolver problemáticas locales y regionales, algunas de ellas, relacionadas con biodiversidad, cambio climático, agua potable,

seguridad alimentaria, agricultura sostenible y energía limpia y renovable, entre muchas otras. Para ello, las Instituciones crean, por un lado, redes de cooperación científica y centros de investigación, muchos de ellos, de carácter interdisciplinario, para implementar soluciones sostenibles y adaptadas a los contextos regionales y, por otro, instituyen programas académicos de formación profesional y de posgrado, con enfoques en sostenibilidad, en gestión ambiental, en economía circular, con el propósito de preparar futuros profesionales, que lideren procesos de transformación sostenible, en los diversos sectores del país.

De igual manera, las Instituciones de Educación Superior colombianas han desarrollado Campus Sostenibles que, en el caso particular de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, integra e implementa las ciencias ambientales, para orientar sus políticas, actividades académicas y todos los aspectos de gestión ambiental, para formar un escenario específico de práctica de los principios de la sostenibilidad, resaltando la responsabilidad social y la coherencia institucional. Es así, que se materializa un sinnúmero de propósitos cardinales, a través de líneas estratégicas y estas, a su vez, en proyectos de acción, bajo un pensamiento holístico y sistémico, transversal a la institución, para que todos los procesos, subprocesos, unidades y programas académicos puedan contribuir, desde lo concerniente a cada una de estas instancias.

Dentro de estas líneas principales, se destacan la Proyección social, cultural y ambiental; la Formación e investigación; el Campus verde y biodiverso; el Entorno saludable; el Consumo sostenible; la Mitigación y adaptación al Cambio Climático; la Construcción sostenible; la Gestión Integral del Recurso Hídrico; la Gestión Integral de Residuos Sólidos y la Gestión y sostenibilidad energética.

Desde la función sustantiva de extensión, las Universidades también han trabajado activamente. La U.D.C.A ha articulado la sostenibilidad en diversos campos, como la Generación y desarrollo de acciones con vinculación transformadora, orientados a prácticas sostenibles en comunidades, instituciones y empresas; la

Implementación de proyectos de extensión solidaria, que fortalecen la gestión ambiental comunitaria, la agricultura sostenible, la seguridad alimentaria, la resiliencia al cambio climático y el compromiso con la salvaguarda del patrimonio ambiental y la biodiversidad; las Alianzas estratégicas con diversos actores del ecosistema, para incidir en la construcción de políticas públicas sostenibles, desde la generación y gestión del conocimiento; los Proyectos de aula viva, prácticas y pasantías, en donde la comunidad universitaria y externa puede co-crear soluciones y aprendizajes a problemáticas del entorno desde soluciones sostenibles. Todos ellos, son procesos participativos, que mejoran la calidad de vida y fortalecen el tejido social.

Por otra parte, las IES colombianas han venido integrando la sostenibilidad en sus programas académicos, de manera creciente, pero con diferentes niveles de profundidad y de compromiso. En un panorama general, la U.D.C.A implementa su currículo para la sostenibilidad, donde se transversaliza como principio para el desarrollo de competencias sostenibles y proyectos de aula, alineados con los ODS. En su oferta académica, por ejemplo, cuenta con un doctorado en Ciencias de la Sostenibilidad, que propone estrategias para afrontar los retos de la sostenibilidad con enfoque transdisciplinar, mediante la co-construcción de conocimiento y desarrollo de investigación original y de vanguardia; ofrece Maestrías, alineadas con los principios de la educación para la sostenibilidad y los ODS: Ciencias Ambientales, Educación Ambiental, Gerencia y Gestión Integral de Residuos Sólidos y Gestión Socio Ambiental (PEI, 2024: 37); son un total de 50 programas, entre pregrado (entre profesionales, técnicos y tecnológicos), especializaciones (presenciales y a distancia), maestrías y doctorados, todos ellos, con un proceso de enseñanza-aprendizaje sistémico, integral, complejo, permanente y sostenible, con estrategias pedagógicas innovadoras, que permiten y que tienen como referente los principios de la sostenibilidad.

Adicionalmente, la Universidad instituyó un Comité de Sostenibilidad, que surge del compromiso que asumieron los Directivos de la Universidad, en el Curso Liderazgo y Gobernanza Universitaria Sostenible - Camino hacia la agenda 2030, organizado por el Instituto Internacional para la Educación Superior en América Latina y el Caribe UNESCO-IESALC, cuyo resultado se materializó en el Plan de Aplicación y ruta Institucional (PAI).

El Comité de Sostenibilidad, entonces, se formaliza en la U.D.C.A como un órgano asesor institucional, que tiene como propósito orientar, promover y hacer seguimiento a las estrategias, que impulsen la transformación de la U.D.C.A hacia la sostenibilidad, asumiendo múltiples responsabilidades, entre ellas, Asesorar en la formulación e implementación de políticas institucionales orientadas a la sostenibilidad institucional, desde las dimensiones ambiental, social, económica y cultural; Desarrollar los conceptos y alcances establecidos en la Política de Sostenibilidad de la Universidad, promoviendo su apropiación institucional e integración transversal; Proponer lineamientos estratégicos y acciones integradas, que contribuyan a la transversalización de la sostenibilidad en los ejes misionales de la universidad: docencia, investigación, extensión y gestión institucional; Identificar oportunidades de mejora y riesgos asociados a la sostenibilidad y formular recomendaciones para su

atención, en coherencia con los marcos normativos nacionales e internacionales; Fomentar una cultura institucional comprometida con la sostenibilidad, mediante el impulso de iniciativas de formación, sensibilización y participación de la comunidad universitaria; Hacer seguimiento y evaluación a los planes, programas y proyectos institucionales relacionados con la sostenibilidad, promoviendo su articulación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y la agenda global; Promover alianzas internas y externas con actores públicos, privados y comunitarios, que fortalezcan las capacidades de la universidad para actuar como agente de cambio en los territorios; Emitir conceptos técnicos y recomendaciones a los órganos de gobierno y dependencias universitarias, para facilitar la toma de decisiones informadas y coherentes con los principios de sostenibilidad; Velar por la inclusión de criterios de sostenibilidad en la planificación y evaluación institucional, incluyendo la infraestructura, la gestión de recursos y el desarrollo de políticas académicas y administrativas.

En resumen, las universidades en Colombia y la U.D.C.A, no solo forman talento humano con conciencia ambiental y responsabilidad social, sino que, también, son agentes activos de cambio en la construcción de un país más justo, resiliente y sostenible.

El auge de la investigación en las universidades colombianas en temas de sostenibilidad

Colombia, sin lugar a duda, ha experimentado un notable crecimiento en su producción, no solo académica sino investigativa, orientado hacia la sostenibilidad, impulsado por diversos factores, que incluye la reciente conciencia sobre la crisis climática, el afán por la carencia de biodiversidad, el apremio por cumplir con los Objetivos de Desarrollo Sostenible y el compromiso de las universidades por responder a estos desafíos sociales, económicos y ambientales del país.

En este radical giro, las Universidades han incursionado rápidamente en investigación dedicada al desarrollo sostenible, generando conocimiento científico y promoviendo la innovación ambiental y tecnológica, para transformar las realidades locales y nacionales.

El auge de la investigación en sostenibilidad en las IES colombianas no solo refleja un avance desde la academia, sino un compromiso moral e íntegro con el futuro del país. La sostenibilidad, a este punto, ya no es solo una tendencia o moda, sino una necesidad y las universidades están desempeñando un papel central en la construcción de un modelo de desarrollo más justo, equitativo y ambientalmente responsable. Son esfuerzos, donde Colombia ha empezado a posicionarse como un referente regional en temas de sostenibilidad, demostrando que el conocimiento producido localmente puede tener un impacto global.

Y, efectivamente, lo que se convirtió en elemento clave en esta ola investigativa es su enfoque interdisciplinario, pues cada vez es común que los proyectos investigativos integren diversos saberes, como la ingeniería, la medicina, las ciencias sociales, la biología, la medicina veterinaria, la arquitectura, la economía, la agronomía, fortaleciendo, además, el vínculo entre la academia, el sector productivo y las comunidades. El trabajo interdisciplinario es esencial para abordar los complejos desafíos del desarrollo sostenible

y la colaboración entre las diferentes disciplinas ha permitido generar soluciones innovadoras y holísticas, que no solo enriquecen la investigación, sino que prepara a los estudiantes y profesionales para enfrentar los retos del mundo real, de manera más efectiva.

Todo el trabajo científico generado desde las universidades del país, con sus grupos y líneas de investigación han sido exitosos; sin embargo, persisten obstáculos financieros, sociales y de desigualdad, que limitan su alcance y efectividad. A pesar de los avances logrados, las universidades colombianas enfrentan varios desafíos en el cumplimiento de los ODS y para superar estos obstáculos, es fundamental que las universidades, el gobierno y el sector privado trabajen juntos, para crear un entorno propicio para la educación y la investigación sostenible.

La investigación en la U.D.C.A en el marco de los ODS

En la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, desde el 2024, viene realizando una vertiginosa y contundente

transformación integral hacia la Sostenibilidad, entendida como la adopción de políticas y de prácticas, que promueven la resiliencia socioecológica, la equidad intergeneracional y la armonía con el ambiente y con nosotros mismos (Figura 1). Esto se evidencia desde su Proyecto Educativo Institucional - PEI, su Misión y su Visión hasta su Plan de Desarrollo Institucional -PDI, los cuales, permean los procesos misionales de formación, de investigación y de extensión y los otros procesos estratégicos y de apoyo, con el fin de aportar en el logro de la Agenda 2030.

La Universidad, con esta apuesta, es consiente que la Sostenibilidad actúa de forma transversal y que se debe convertir en un rasgo constitutivo y diferenciador, dirigiendo todo su accionar de gestión y de gobernanza, en el cumplimiento de las metas propuestas en los ODS, para aportarle, positivamente, a la sociedad colombiana (PEI, 2024: 23).



Figura 1. Concepto de Sostenibilidad para la U.D.C.A.

En el marco de estas políticas institucionales y tomando como eje transversal la sostenibilidad y su transición, la U.D.C.A, entonces, articula la investigación como pilar para la generación y aplicación del conocimiento científico y tecnológico, destacando su rol crucial, en la búsqueda de la sostenibilidad y el desarrollo equitativo (PEI, 2024: 39). Para ello, centra sus acciones en el Fomento de líneas de investigación interdisciplinarias, que dan cuenta de la sostenibilidad, como eje articulador; en los Semilleros de investigación, quienes abordan problemáticas desde una mirada ecosistémica; en el Apoyo a proyectos que integran saberes científicos, en contextos rurales y comunidades vulnerables; en la Promoción de publicaciones científicas, que visibilizan el compromiso institucional con la transformación social y ambiental.

La Universidad está comprometida con una investigación y una innovación que son relevantes y efectivas, donde combina la formación académica con la producción de conocimientos

aplicables. La integración de estos componentes, junto con la gestión efectiva de los procesos de investigación, asegura que la U.D.C.A contribuya al desarrollo sostenible y al bienestar de la sociedad, enfrentando, de manera integral, los desafíos contemporáneos.

El compromiso de la U.D.C.A está orientado al cambio cultural y de valores, promoviendo una transformación en las actitudes, los comportamientos y los valores colectivos, hacia una visión compartida de sostenibilidad.

A modo de conclusión, las universidades colombianas han demostrado un gran interés por incorporar la sostenibilidad en sus agendas académicas, investigativas y de extensión y proyección social, lo que refleja su compromiso con el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, puesto que alinean todos sus proyectos a este fin.

Aunque a la vista se perciben avances significativos en la producción de conocimiento científico sobre sostenibilidad es necesario potencializar la investigación, la innovación y el emprendimiento y mejorar los mecanismos para la transferencia de estos resultados hacia las políticas públicas, hacia las comunidades y hacia los sectores productivos y así cerrar la brecha entre la investigación y su aplicación práctica; necesitan fortalecer su gestión ambiental, la evaluación de impacto y la articulación con actores externos.

Las universidades también son las primeras llamadas a cumplir un papel fundamental en la formación de ciudadanos conscientes y comprometidos con la sostenibilidad, fortaleciendo la educación ambiental, la participación estudiantil y el sentido de responsabilidad social.

REFERENCIAS

COMISIÓN ECONÓMICA PARA AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE, CEPAL. 2025. América Latina y el Caribe y la Agenda 2030 a cinco años de la meta ¿Cómo gestionar las transformaciones para acelerar el progreso? Octavo informe sobre el progreso y los desafíos regionales de la Agenda 2030

para el Desarrollo Sostenible en América Latina y el Caribe. Disponible desde Internet en: <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/1c7d9df9-fd4d-42fb-90dc-2e6378b9b7c9/content>

PROYECTO EDUCATIVO INSTITUCIONAL, PEI. 2024. Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A. Disponible desde Internet en: <https://www.udca.edu.co/wp-content/uploads/2024/10/pei/PEI-2024.html>

SOSTENIBLES.ORG. 2024. Informe de progreso sobre el Desarrollo Sostenible (SDR) 2024. 25 junio 2024. Disponible desde Internet en: <https://sostenibles.org/2024/06/25/informe-de-progreso-sobre-el-desarrollo-sostenible-sdr-2024/>

Respuesta del cacao (*Theobroma cacao*) clon CCN-51 a la fertilización en condiciones agroclimáticas del Trapecio Amazónico Colombiano

Response of the cocoa (*Theobroma cacao*) CCN-51 clone to fertilization under agroclimatic conditions of the Colombian Amazon Trapezium

Gelber Rosas-Patiño^{1*} ; Verenice Sánchez-Castillo¹ ; Carlos Patiño-Torres² 

¹Universidad de la Amazonia, Facultad de Ingeniería. Florencia - Caquetá, Colombia; e-mail: g.rosas@udla.edu.co; ve.sanchez@udla.edu.co

²Universidad del Tolima, Facultad de Ingeniería Agronómica. Ibagué - Tolima, Colombia. e-mail: copatinot@ut.edu.co

*autor para correspondencia: g.rosas@udla.edu.co

Cómo citar: Rosas-Patiño, G.; Sánchez-Castillo, V.; Patiño-Torres, C. 2025. Respuesta del cacao (*Theobroma cacao*) clon CCN-51 a la fertilización en condiciones agroclimáticas del Trapecio Amazónico Colombiano. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 28(1):e2563. <http://doi.org/10.31910/rudca.v28.n1.2025.2563>

Artículo de acceso abierto publicado por Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, bajo una Licencia Creative Commons CC BY-NC 4.0

Publicación oficial de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Institución de Educación Superior Acreditada en Alta Calidad por el Ministerio de Educación Nacional

Recibido: marzo 11 de 2024

Aceptado: mayo 27 de 2025

Editado por: Helber Adrián Arévalo Maldonado

RESUMEN

El clon CCN-51 es uno de los más utilizados en la siembra de cultivos de cacao en Suramérica por su excelente producción, adaptabilidad y tolerancia a enfermedades, pero su desempeño no ha sido suficientemente estudiado en la Amazonía colombiana. Esta investigación se centró en conocer el efecto de la fertilización y el clima en el comportamiento productivo del clon en condiciones del trapecio amazónico. En un jardín clonal de cacao, se estableció un diseño de bloques completos al azar, con y sin fertilización y se llevaron registros mensuales de mazorcas sanas, mazorcas enfermas, producción y pérdida de grano seco. Se correlacionaron los datos de producción con la precipitación, la temperatura, el brillo solar y la humedad relativa y se comparó la producción del clon de cacao con los reportes nacionales de cosecha, durante el periodo de estudio. Los resultados evidenciaron que la producción de mazorcas por árbol no se vio afectada por la fertilización y la cantidad de mazorcas sanas fue superior a las enfermas. Se registraron dos picos de cosecha en mayo y septiembre, que se correlacionan con el brillo solar. La baja fertilidad de los suelos no resulta limitante para que el cacao clon CCN-51 alcance rendimientos importantes, con bajas pérdidas por pudrición de mazorca, lo que resulta favorable para los cacaocultores.

Palabras clave: Calendario cacaotero; Interacción genotipo-ambiente; *Moniliophthora roreri*; *Phytophthora* sp.; Rendimiento de cacao.

ABSTRACT

The CCN-51 clone is one of the most used in planting cocoa crops in South America due to its excellent production, adaptability, and disease tolerance. Still, its performance has not been widely studied in the Colombian Amazon. This research focused on understanding the effect of fertilization and climate on CNN-51 productive behavior in Amazon trapezium conditions. In a clonal cocoa garden, a randomized complete block design was established, with and without fertilization, and monthly records were kept of healthy cocoa pods, diseased pods, production, and dry grain loss. Production data were correlated with precipitation, temperature, sunlight, and relative humidity, and the production of the cocoa clone was compared with the national harvest reports during the study period. The results showed that the production of pods per tree was unaffected by fertilization, and the number of healthy pods was higher than that of diseased pods. Two harvest peaks were recorded in May and September, correlating with solar brightness. The low soil fertility is not a limitation for the cocoa CCN-51 clone to achieve significant yields, with low loss due to cocoa pod rot, which is favorable for cocoa farmers.

Keywords: Cocoa calendar; Cocoa yield; Genotype-environment interaction; *Moniliophthora roreri*; *Phytophthora* sp.

INTRODUCCIÓN

El cacao es un cultivo de gran importancia en Colombia y que, cada vez, toma mayor relevancia como alternativa de producción en las familias campesinas de la Amazonia colombiana. En la Amazonia continental, conformada por parte de Brasil, Perú, Ecuador y Colombia, se encuentran de manera silvestre numerosas especies del género *Theobroma* (González-Orozco *et al.* 2020).

Algunos materiales con excelentes características genotípicas han sido aislados, mejorados y propagados masivamente, como estrategia tecnológica para impulsar su producción con fines comerciales. Se conocen tres variedades de cacao de importancia agronómica (Fedecacao, 2013): “criollo”, originario de Centroamérica, Antillas y norte de Suramérica; “forastero”, región Amazónica y “trinitario”, híbrido entre criollo y forastero. El clon Colección Castro Naranjal (CCN-51) corresponde a la variedad forastero es un híbrido creado a partir del IMC 67 y el ICS 95 por el productor Homero Castro Zurita, en la finca “Naranjal”, en la región de Guayas, Ecuador (Boza *et al.* 2014); se cultiva abundantemente en diferentes países productores de cacao, por su autocompatibilidad en la fecundación floral, alto rendimiento, adaptabilidad a diferentes ambientes y tolerancia a enfermedades (Jaimez *et al.* 2022).

La producción en las plantaciones de cacao está condicionada, entre otros aspectos, por las condiciones ambientales, el tipo de clon y las condiciones fisicoquímicas del suelo (Rosas-Patiño *et al.* 2019). El número de mazorcas por árbol y las pérdidas por pudrición de mazorca se pueden ver afectada por los cambios en la precipitación, la temperatura, el brillo solar y la humedad atmosférica a lo largo del año cacaotero (Meneses-Buitrago *et al.* 2019; Mena-Montoya *et al.* 2020; García-Cruzatty *et al.* 2020).

A pesar de que CCN-51 es uno de los clones más implementados en las plantaciones comerciales de la región amazónica son escasos los registros de los efectos de la fertilización edáfica y las condiciones ambientales en su comportamiento productivo, a lo largo de un año cacaotero. Conocer estos aspectos permitirá tomar mejores decisiones en el establecimiento y manejo de plantaciones con CCN-51.

Por lo tanto, el presente trabajo tuvo como objetivos evaluar los efectos de la fertilización de síntesis química en la producción de mazorcas sanas y enfermas, conocer el comportamiento productivo anual del clon en condiciones climáticas del trapezio amazónico y relacionar el comportamiento productivo del CCN-51 con la producción de cacao en Colombia.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se desarrolló en un jardín clonal de cacao *T. cacao*, propiedad de la Asociación Departamental de Productores de Cacao y Especies Maderables del Caquetá (Acamafrut), ubicado en el Departamento de Caquetá, municipio de Puerto Rico, con coordenadas geográficas N 1°52'12", W 75°12'24", a 250 m s.n.m., en instalaciones del Jardín clonal (J.C.). Se encuentra ubicado

dentro del trapezio amazónico, a 250 m s.n.m., en las estribaciones de la cordillera Oriental. La zona presenta un paisaje de lomeríos, con temperaturas medias de 22 a 24 °C, precipitación media anual de 4.063 mm, brillo solar de 3,7 horas/día y humedad relativa de 83 % (IDEAM, 2017).

La plantación policlonal de cacao se encuentra conformada por material de TSH-565, ICS-39, ICS-1 CCN-51, ICS-60, ICS-95, IMC-67, entre otros clones; fueron sembrados en el 2010, en un área de 1,5 hectáreas, a una distancia de 3 metros entre plantas y 3 metros entre surcos. En el 2014, se seleccionaron árboles de CCN-51 con siete años, establecidos en condiciones agronómicas similares. Desde su establecimiento hasta los siete años, recibieron aplicaciones de 300 g de cal dolomita, 200 g de 15-15-15 (N-P-K) y 1 kg de abono orgánico compostado por árbol, dos veces al año. Para el ensayo, los árboles dejaron de fertilizarse por un año, se realizaron prácticas de manejo como control manual de plagas y enfermedades y podas al 50 % de área foliar al inicio de marzo. Estas prácticas se mantuvieron durante la investigación.

Se utilizó un diseño de bloques completos al azar con dos tratamientos (con y sin fertilizante) y cuatro repeticiones. En cada tratamiento se seleccionaron cuatro árboles, para un total de ocho unidades experimentales, donde la unidad experimental estuvo compuesta por cada árbol de cacao.

A partir de la fertilidad inicial del suelo y los requerimientos del cultivo planteados por Puentes-Páramo *et al.* (2014) y Baligar & Fageria (2005), se establecieron los tratamientos, como se evidencia en la tabla 1. La fertilización se inició en el 2015 y se fraccionó en dos aplicaciones al año, se depositó en la superficie del suelo en la zona de plato, la primera en abril y la segunda en agosto. Los fertilizantes utilizados fueron: urea (46-00-00 %), como fuente de nitrógeno; N-K-P (00-52-34 %), como fuente de potasio y fósforo y KCl (00-00-60 %), como fuente de potasio. La necesidad de fertilizante a aplicar (NF_x) para cada nutriente se estimó a partir de la siguiente ecuación (Rodríguez & Rodríguez, 1993):

$$NF_x = \frac{\text{Requerimiento cultivo (kg)} - \text{Aporte del suelo (kg)}}{\text{Eficiencia del fertilizante}} \times 100$$

La eficiencia del fertilizante para N-P-K fue de 50, 30 y 60 %, respectivamente (Puentes-Páramo *et al.* 2014).

Para conocer el comportamiento de la producción, se llevó el registro de enero a diciembre de 2016, cada 15 días, del número de mazorcas sanas (MazSan) y mazorcas enfermas (MazEnf) por árbol. Las MazSan correspondieron a frutos sin afectación por agentes fitosanitarios y con granos aprovechables, y las MazEnf, a frutos sin granos aprovechables y afectados por el complejo pudrición de mazorca ocasionada por *Moniliophthora roreri* o *Phytophthora* sp., principales patógenos que afectan el cultivo en la zona. Se determinó la producción y las pérdidas de cosecha en kg/ha, mediante la relación de MazSan y MazEnf por árbol (respectivamente) y el índice de mazorca (IM) de cada tratamiento (datos no publicados); para ello, se consideró una densidad de siembra de 1.000 árboles por hectárea.

Tabla 1. Características químicas del suelo para cada tratamiento evaluado en la producción de cacao clon CCN-51, en el Trapecio Amazónico colombiano, a 30 cm de profundidad.

Tratamiento	pH	CIC	Al	Fe	Mn	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca	Mg
	---	cmol(+)/kg	mg/kg			Kg/ha/año				
T ₁ : sin fertilización	4,4	4,7	89,3	102,8	19,1	11,2	10,0	60,0	152,5	18,7
T ₂ : con fertilización						73,0	35,2	219,7		

Del mismo modo, se obtuvieron los registros medios mensuales, correspondientes al 2016, de precipitación (mm), de temperatura (°C), de brillo solar (h) y de humedad relativa (%) de la estación climática del Instituto de Hidrología y Estudios Ambientales (IDEAM), más próxima a la zona de estudio, con el fin de realizar análisis descriptivos y correlacionales.

El efecto de la fertilización, los periodos de cosecha y sus interacciones sobre la producción anual y mensual, se determinó a partir de modelos lineales generalizados mixtos ($p < 0,0001$), utilizando la distribución normal y se realizó la prueba Di Rienzo, Guzmán y Casanoves (DGC), para la comparación entre las medias ($p < 0,05$) (Di Rienzo *et al.* 2020). El comportamiento de la producción de MazSan y MazEnf por árbol (registros mensuales), durante el periodo de estudio, se visualizaron a partir de perfiles multivariados.

Con la finalidad de interpretar la relación entre variables climáticas y la producción de mazorcas/árbol, con los registros climáticos y productivos, se elaboraron gráficos de puntos; además, se estimó la correlación entre la producción de mazorcas y registros climáticos, a partir de la prueba de Spearman (prueba de rangos para variables no paramétricas). Al final, se compararon mediante un gráfico descriptivo de barras, los registros porcentuales mensuales de producción del clon de cacao CCN-51, obtenidos en esta investigación, con la producción de cacao nacional. El análisis estadístico se realizó mediante el programa estadístico InfoStat-Profesional, versión 2020p (Di Rienzo *et al.* 2020).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Efecto de la fertilización en la producción de mazorcas. La producción general de mazorcas por árbol, durante el año cacaotero de 2016, no se vio afectada por la aplicación de fertilizantes ($p < 0,0001$); la cantidad de MazSan ($41,45 \pm 2,28$) fue superior ($p < 0,05$) a MazEnf ($7,18 \pm 0,95$). A pesar de que los árboles fertilizados presentaron registros de producción de mazorcas levemente superior (4 y 2 mazorcas más, respectivamente) a los árboles sin fertilizar, las diferencias entre las medias no fueron estadísticamente significativas.

El clon de cacao CCN-51 no incrementó la producción de mazorcas por efecto de la aplicación de N, P y K para llevarlos a los niveles sugeridos en algunas investigaciones, como las de Baligar & Fageria (2005) y Puentes-Páramo *et al.* (2014), evidenciando baja respuesta

del clon al uso de fertilizantes y cierta habilidad para gestionar los nutrientes disponibles en la fertilidad natural del suelo, como lo reportaron Rosas-Patiño *et al.* (2019), quienes encontraron que el clon no responde significativamente a las fertilizaciones de N-P-K cuando los suelos presentan niveles de fertilidad natural, similares a los utilizados en esta investigación.

Al parecer, el clon es eficiente en el uso de nutrientes y requiere bajas cantidades para expresar su potencial de producción. La producción media de frutos por árbol fue muy superior a la reportada por Mendoza-Meneses *et al.* (2023), quienes registraron producciones para el mismo clon cercanas a 23 mazorcas/árbol en el estado de San Luis Potosí, México, en árboles de siete años; sin embargo, la cantidad de mazorcas encontradas en este estudio resultaron menores a los registros de Leiva-Rojas *et al.* (2019), en plantaciones de ocho años, en Chigorodó Antioquía, Colombia, quienes hallaron producciones de 58 frutos por árbol/año.

La cantidad de MazEnf representó alrededor del 8,70 %, lo que se considera baja, comparativamente con registros de clones susceptibles, en donde se pueden encontrar pérdidas cercanas al 80 % (Krauss *et al.* 2006), pero coincidentes con otras investigaciones en el clon de cacao CCN-51 que registran mínimas pérdidas de mazorcas (<10 %), por pudrición del fruto, gracias a la moderada resistencia del clon al ataque de *Moniliophthora roreri* o *Phytophthora* sp. (Kieck *et al.* 2016; Cubillos, 2017; Jaimez *et al.* 2022). Además de las características tolerantes del clon es probable que la poda de los árboles y la recolección quincenal de frutos sanos y enfermos ayudaran a mantener los bajos niveles de infestación, como lo sugieren Rodríguez-Polanco *et al.* (2021).

Producción mensual de mazorcas durante el año 2016. La producción de mazorcas sanas y enfermas por árbol varió durante el calendario de cosecha, pero no se vio afectada por la aplicación de fertilizantes, ni se presentó efecto por la interacción entre factores ($p < 0,0001$).

En el diagrama de perfiles multivariados (Figura 1) es posible visualizar que el clon de cacao CCN-51 presentó dos momentos de alta producción ($p < 0,0001$) en el 2016: en septiembre, con 10 y mayo, con 7 mazorcas/árbol. A pesar de alcanzar importantes registros de producción un mes antes y un mes después de la cosecha (especialmente en el mayor pico de producción), en agosto

y octubre, los registros no resultaron diferentes a los alcanzados el resto del año ($p < 0,05$). En los demás meses, aunque hubo producción de mazorca, los valores reportados fueron los más bajos. El clon de cacao CCN-51 registra dos picos de cosecha, pero mantiene producción de mazorcas durante todo el año.

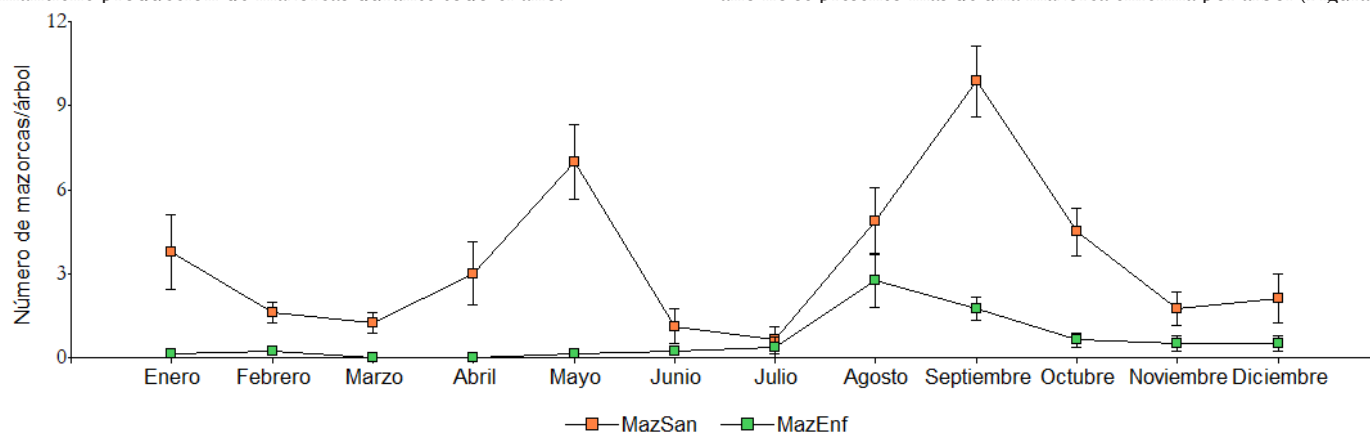


Figura 1. Diagramas dot-plot de perfiles multivariados para mazorcas sanas y mazorcas enfermas del cacao clon CCN-51, durante el 2016, en el Trapecio Amazónico colombiano

El ciclo fenológico del cacao está compuesto por los periodos vegetativo, reproductivo, de cosecha y de reposo (Sosa & Ramírez, 2020). El periodo vegetativo se pudo haber presentado a partir de marzo, luego de la poda, hasta abril, teniendo en cuenta que esta fase tarda alrededor de 45 días, aunque en zonas de precipitación constante, la fase vegetativa es permanente (Leiva-Rojas *et al.* (2019).

El periodo reproductivo está determinado por la floración y producción de polen. Este periodo fue extenso durante el 2016 (desde marzo hasta julio), debido a que en la zona de estudio, de marzo a julio de 2016, se presentaron precipitaciones mensuales superiores a 290 mm y temperaturas cercanas a 25 °C, lo que pudo favorecer la producción de polen. García Cruzatty *et al.* (2017) afirman que la formación de la mazorca está en función de variables ambientales, como el brillo solar, precipitación y la temperatura; en consonancia, Mena-Montoya *et al.* (2020) encontraron correlación positiva moderada entre la polinización y a temperaturas superiores a 26 °C, aunque encontraron relación positiva entre precipitaciones y producción de polen, esta fue débil.

Por su parte, Zuidema *et al.* (2005), mediante un modelo predictivo, encontraron una estrecha correlación positiva entre la precipitación (meses antes de la maduración de la mazorca) y la producción de cacao. Las condiciones de la zona resultan ideales para el periodo reproductivo, en particular, para el clon de cacao CCN-51, material que se caracteriza por su alta eficiencia en la producción de polen (García-Cruzatty *et al.* 2020).

En esta investigación, el periodo de cosecha se presentó en septiembre y uno menor en mayo; es probable que la poda y la fertilización de marzo estimulara la fase reproductiva (en marzo y abril) y a partir de esta, se generó el cuajado y maduración de los frutos. Lo anterior considerando que un fruto tarda, desde la polinización, de cinco a seis meses para alcanzar la maduración y punto de cosecha

Con relación a MazEnf, se presentaron diferencias entre los reportes mensuales ($p < 0,05$); los meses de mayor afectación fueron agosto y septiembre, cuando se alcanzó el mayor pico de cosecha, se registraron entre dos y tres MazEnf por árbol; durante el resto del año no se presentó más de una mazorca enferma por árbol (Figura 1).

(Prabhakaran Nair, 2010). El clon de cacao CCN-51 mantiene producción durante todo el año, pero en el pico de septiembre, el de mayor producción, se obtuvo 30 % más mazorcas con relación al de mayo; en cinco meses (febrero, marzo, junio, julio y noviembre). aunque hubo producción, estas fueron menores a dos mazorcas por árbol. El clon de cacao CCN-51 presentó periodo de reposo entre noviembre y diciembre y junio y julio, luego de alcanzar los picos de cosecha.

Relación de la producción del clon de cacao CCN-51 y variables climáticas. La producción permanente de mazorcas en este clon puede corresponder a las condiciones constantes de brillo solar, altas precipitaciones y temperaturas superiores a los 25 °C. propias de la zona (Figura 2), las cuales, resultan ideales para la producción de polen (García-Cruzatty *et al.* 2020). Considerando que las mazorcas de este clon maduran aproximadamente entre cinco y seis meses en la zona evaluada desde la fecha de la polinización y que existe una correlación negativa entre temperatura y días de maduración (Prabhakaran Nair, 2010), se puede plantear que el pico de cosecha de mayo requirió menos tiempo para la maduración de los frutos (cinco meses), en comparación al pico de septiembre, que requirió seis meses.

Lo anterior, pudo obedecer a que en enero se registraron mayores niveles de brillo solar y temperaturas, pero con presencia de lluvias (Figuras 2A, 2D y 2B); por su parte, el mayor pico de producción del 2016, presentado en septiembre, pudo corresponder a que en abril se presentaron las mayores precipitaciones, con temperaturas altas (superiores a 25 °C) y brillo solar superior a 93 h, es decir, el primer ciclo, el más corto, estuvo promovido por las altas temperaturas y, el segundo, el más largo, por las altas precipitaciones, pero siempre en condiciones climáticas propias del trópico, que favorecen la producción del fruto de *T. cacao*.

En investigaciones anteriores, García Cruzatty *et al.* (2017) reportaron que la formación de la mazorca depende de variables ambientales, como el fotoperíodo, precipitación y la temperatura. Para el clon de cacao CCN-51, las condiciones ambientales ideales para la formación del fruto son las épocas con precipitaciones y temperaturas cercanas a 26 °C (García-Cruzatty *et al.* 2020), como en efecto ocurrió cinco meses antes de los periodos de máxima cosecha en este estudio.

Los tiempos de maduración de fruto reportados en este estudio coinciden con los de Meneses-Buitrago *et al.* (2019), quienes encontraron que en zonas del Cauca, Colombia, con precipitaciones medias anuales de 1.500 mm/año y temperaturas medias de 26 °C, un fruto tarda cinco meses en formarse y madura; sin embargo, este tiempo puede aumentar, si la temperatura disminuye 1,5 °C. Los cambios ambientales pueden afectar los ciclos de cosecha de *T. cacao*.

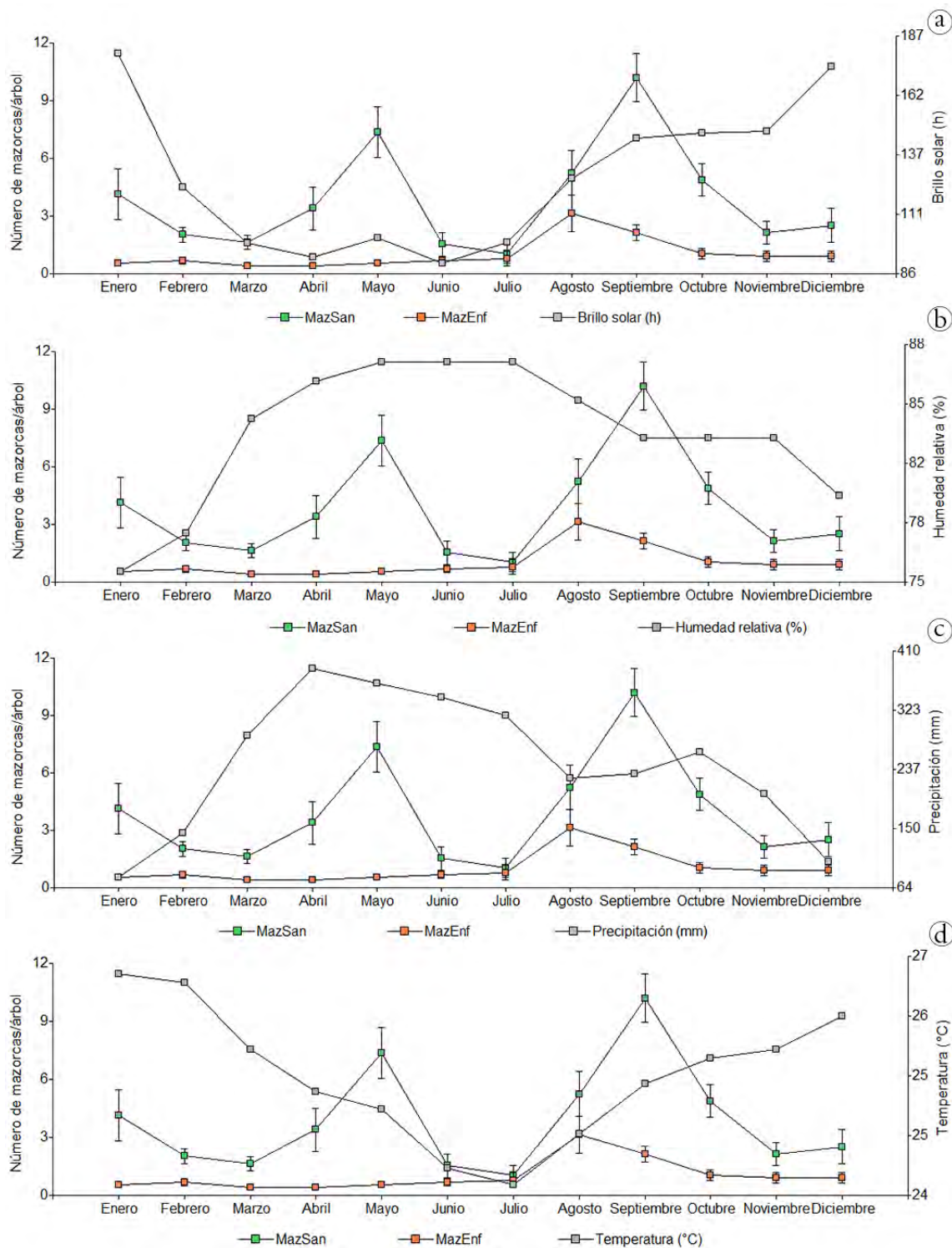


Figura 2. Comportamiento de las variables de producción de cacao clon CCN-51, en el Trapecio Amazónico colombiano, en función de factores climáticos: a) brillo solar; b) humedad relativa; c) precipitación y d) temperatura.

La producción de mazorcas enfermas fue significativamente mayor en agosto y septiembre, cuando la producción se incrementó, justo luego de que en junio y julio (dos meses antes) se registraran las menores temperaturas (24,3 °C) y mayor humedad relativa (87 %), como se evidencia en la figura 2B y 2D. Mayores registros de humedad atmosférica favorecen el desarrollo de enfermedades en cacao (Meneses-Buitrago *et al.* 2019).

Correlación de la producción de mazorcas sanas y enfermas con las variables climáticas durante el 2016. Los registros de producción de MazSan y MazEnf obtenidos para el 2016 presentaron

correlación positiva débil con el brillo solar ($p < 0,05$); con las demás las variables climáticas no se evidenciaron correlaciones (Tabla 2). Lo anterior, se puede deber a que los registros de brillo solar fueron de 1.538,6 hora luz/año (es decir, 4,27 h/día), resultaron favorables para la producción y desarrollo del fruto. Suárez *et al.* (2021) encontraron alta eficiencia fotosintética del clon de cacao CCN-51 en condiciones de 1.200 hora luz/año, en sistemas agroforestales de la Amazonia colombiana. Zuidema *et al.* (2005) reportaron que la radiación solar está relacionada con la producción de cacao, puesto que las condiciones ideales de luz favorecen la actividad fotosintética del cultivo.

Tabla 2. Coeficientes de correlación de Spearman entre el número de mazorcas sanas y enfermas por árbol de cacao clon CCN-51 y las variables climáticas, en el Trapecio Amazónico colombiano, para el 2016.

Variable(1)	Variable(2)	Spearman	<i>p-valor</i>
MazSan	Precipitación (mm)	0,380	0,951
	Temperatura (°C)	-0,010	0,971
	Brillo solar (h)	0,004	0,032
	Humedad relativa (%)	-0,080	0,427
MazEnf	Precipitación (mm)	-0,190	0,068
	Temperatura (°C)	-0,090	0,360
	Brillo solar (h)	0,220	0,028
	Humedad relativa (%)	-0,090	0,363

MazSan: mazorcas sanas; MazEnf: mazorcas enfermas.

A pesar de que se ha reportado en varios trabajos la relación de la pudrición de mazorca por *Phytophthora* sp. o *Moniliophthora roreri* con factores ambientales, como alta humedad relativa, bajas temperaturas y altas precipitaciones (Ramírez Gil, 2016), tal correlación no se demostró en esta investigación. Lo anterior, probablemente, debido a que la incidencia de *M. roreri* ocurre en épocas de alta humedad, pero se observan síntomas en las mazorcas enfermas días después, cuando las condiciones climáticas han variado. Seng *et al.* (2014) reportaron cambios en el porcentaje de infección con *M. roreri* de mazorcas de cacao 15 días después de la infección, aunque las evidencias pueden variar, según las condiciones ambientales y el tipo de clon; sin embargo, estos resultados son exploratorios y no permiten realizar afirmaciones concluyentes sobre el comportamiento de la pudrición de mazorca.

Relación grano seco del clon de cacao CCN-51 vs producción nacional. En concordancia, con el IM estimado en este cultivo, los datos de MazSan representan una producción aproximada de 3,11 kg/árbol. Estos registros resultan menores a los reportados por Leiva-Rojas *et al.* (2019), quienes registraron rendimientos de 4,7 kg/árbol y similares a los reportados por Rosas-Patiño *et al.* (2021), al obtener altas producciones de CCN-51, en estos suelos de baja fertilidad y pH extremadamente ácidos.

Por su parte, MazEnf representaron una pérdida del 8,7 % de las mazorcas por los agentes *Phytophthora* sp. o *Moniliophthora roreri*, lo que se puede considerar baja y muy favorable para el productor, puesto que, en otros materiales, estos patógenos pueden ocasionar

pérdidas hasta del 70 % (Jaimez Suárez & Aranzazu Hernández, 2010). Ramírez Gil (2016) reportó pérdidas superiores en Antioquía, cercanas al 14,7 %, por ataque de estas enfermedades. Los datos coinciden con lo expuesto por Kieck *et al.* (2016), quienes mencionan que el clon CCN-51 presenta ventajas comparativas con respecto a otros clones, en aspectos como rendimiento y resistencia a enfermedades.

La producción nacional de cacao seco para el 2016, en 173.016 hectáreas registradas, fue de 56.785 toneladas, con rendimientos de 0,45 t/ha (Minagricultura, 2021). Estos rendimientos son inferiores a los encontrados para CCN-51 en esta investigación; sin embargo, es importante destacar que los registros nacionales pueden ser menos exactos, puesto que no toda la producción es reportada.

Producción porcentual del clon de cacao CCN-51 y registros nacionales para el 2016. Con relación a la distribución porcentual para el 2016 (Figura 3), la producción nacional registró dos picos de cosecha, en los periodos de mayo - junio y noviembre - diciembre, cada pico representó el 22,1 y 26,8 %, respectivamente (Minagricultura, 2020), es decir, aproximadamente el 49 % de la producción se colecta en estas dos épocas, siendo mayor la producción que se alcanzó a fin de año. En Colombia, según Fedecacao (2013), se ha implementado la siembra de clones introducidos, entre los que se destacan los ICS (Imperial College Selection), CCN-51, TSH (Trinidad Selection Hybrid), IMC (Iquitos Mixed Calabacillo) y, regionales, como FLE (Fedecacao

Lebrija Santander), FSA (Fedecacao Saravena Arauca), FSV (Fedecacao San Vicente Santander) y FEC (Fedecacao El Carmen), lo que puede ocasionar que los periodos de cosecha no sean homogéneos; más aún, si se considera que en Colombia las zonas

cacaoteras (valles interandinos secos, el bosque húmedo tropical y la zona cafetera) presentan variabilidad edafoclimática y diferentes niveles de aptitud, para el establecimiento y desarrollo del cultivo de cacao (Minagricultura, 2020).

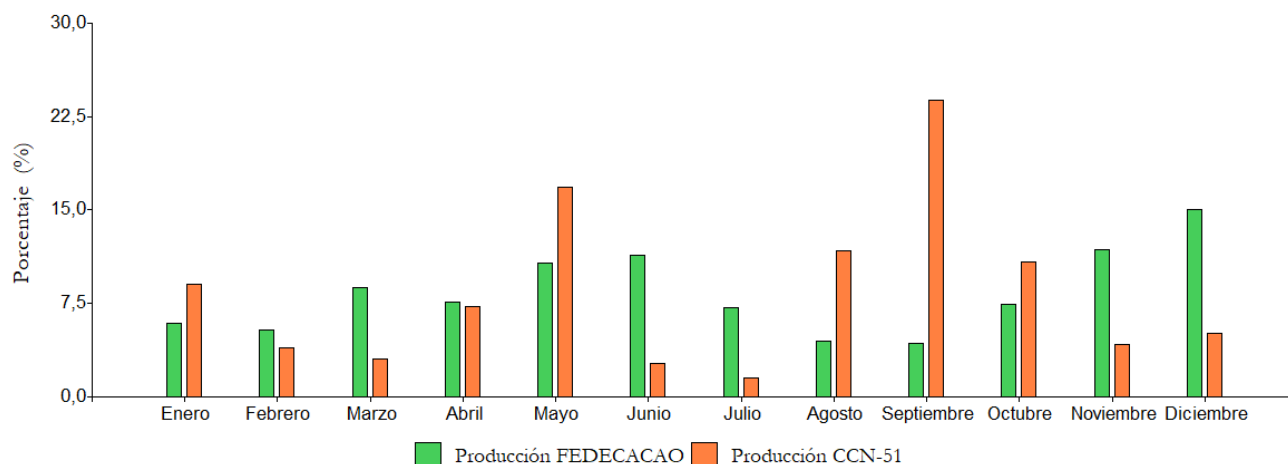


Figura 3. Distribución de la producción mensual de mazorcas de cacao en Colombia y del clon CCN-51, para el 2016.

El clon de cacao CCN-51, por su parte, concentró sus mayores producciones en mayo (16,9 %), coincidiendo, en esta primera cosecha, con la producción nacional y en septiembre (23,8 %), donde registró casi un cuarto del total de cosecha anual (Figura 3). Aunque la producción nacional y la del clon de cacao CCN-51 presentaron dos épocas de cosecha, se registraron producciones en todos los meses del año; sin embargo, en junio-julio y agosto-septiembre la producción resultó más baja para el clon de cacao CCN-51 y la producción porcentual nacional, respectivamente; al parecer, en estos meses los cultivos de cacao se encontraban en un periodo de reposo (Sosa & Ramírez, 2020). Las diferencias en el ciclo fenológico del año cacaotero se pueden deber a la variabilidad ambiental de los sitios, a diferencias en las prácticas de manejo, a los sistemas agroforestales establecidos y a las especificidades genotípicas de los clones (Tosto *et al.* 2023); esto hace que los frutos presenten tiempos de maduración diferentes y se pueda dar, incluso, seis u ocho meses después de la floración (Gallego *et al.* 2022).

Tanto los registros de la producción nacional como los reportes para el clon CCN-51, en esta investigación, coinciden en evidenciar dos picos de cosecha y producciones menores durante todo el año, lo que puede ser una alternativa socioeconómica importante para los cacaocultores, para mantener ingresos de subsistencia permanente.

Se puede concluir que el clon de cacao CCN-51 puede mantener niveles superiores de producción y bajas pérdidas por pudrición de mazorca, aun cuando la oferta de nutrientes corresponde a suelos de baja fertilidad natural. El clon de cacao CCN-51 presenta dos periodos de cosecha bien definidos a lo largo del año cacaotero, pero mantiene producción todo el año. No se evidenciaron correlaciones entre variables climáticas y la producción de mazorcas sanas y enfermas, salvo para el brillo solar, lo que pudo incidir en el periodo reproductivo, que resultó similar a los reportes para Colombia, pero con rendimientos por hectárea significativamente mayores para el clon.

Agradecimientos: los autores expresan su agradecimiento a los cacaocultores del Caquetá, especialmente, a Edilson Giraldo (Acamafrut), q.e.p.d. **Conflictos de intereses:** el manuscrito fue preparado y revisado con la participación de todos los autores, quienes declaramos que no existe ningún conflicto de intereses que ponga en riesgo la validez de los resultados. **Financiación:** este estudio fue financiado con recursos de Acamafrut y el grupo de investigación en agroecología y desarrollo rural (GIADER) de la Universidad de la Amazonia. **Contribución de los autores:** Gelber Rosas Patiño: conceptualización, metodología, investigación, escritura borrador original y supervisión; Verénice Sánchez-Castillo: análisis formal, escritura-revisión y edición; Carlos Patiño-Torres: escritura, depuración de datos y escritura-revisión.

REFERENCIAS

- BALIGAR, V.C.; FAGERIA, N.K. 2005. Soil aluminum effects on growth and nutrition of cacao. *Soil Science and Plant Nutrition*. 51(5):709-713. <https://doi.org/10.1111/j.1747-0765.2005.tb00097.x>
- BOZA, E.J.; MOTAMAYOR, J.C.; AMORES, F.M.; CEDENO-AMADOR, S.; TONDO, C.L.; LIVINGSTONE, D.S.; SCHNELL, R.; GUTIÉRREZ, O.A. 2014. Genetic characterization of the cacao cultivar CCN 51: its impact and significance on global cacao improvement and production. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 139(2):219-229. <https://doi.org/10.21273/JASHS.139.2.219>
- CUBILLOS, G. 2017. Frosty Pod Rot, disease that affects the cocoa (*Theobroma cacao*) crops in Colombia. *Crop Protection*. 96:77-82. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2017.01.011>

- DI RIENZO, J.A.; CASANOVES, F.; BALZARINI, M.G.; GONZALEZ, L.; TABLADA, M.; ROBLEDO, C.W. 2020. Grupo Centro de transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba. InfoStat Version. Argentina. Disponible desde Internet en: <http://www.infostat.com.ar>
- FEDERACIÓN NACIONAL DE CACAOTEROS DE COLOMBIA, FEDECACAO. 2013. Características de calidad del cacao de Colombia: catálogo de 26 cultivares. Bucaramanga. 107p.
- GALLEGO, A.M.; ZAMBRANO, R.A.; ZULUAGA, M.; CAMARGO RODRÍGUEZ, A.V.; CANDAMIL CORTÉS, M.S.; ROMERO VERGEL, A.P.; ARBOLEDA VALENCIA, J.W. 2022. Analysis of fruit ripening in *Theobroma cacao* pod husk based on untargeted metabolomics, Phytochemistry. 203:113412. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2022.113412>
- GARCÍA CRUZATTY, L.C.; RIVERO, M.; VÁSCONEZ, G.; PEÑARRIETA, S.; DROPELMANN, F. 2017. Eficiencia reproductiva y producción de polen en *Nothofagus alpina* en un huerto semillero clonal. Bosque. 38(1):133-139. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002017000100014>
- GARCÍA-CRUZATTY, L.C.; VERA-PINARGOTE, L.; ZAMBRANO GAVILANES, F.; ZAMORA-GARCÍA, A.; CEDEÑO-ORTEGA, J. 2020. Pollen production in *Theobroma cacao* L. genotypes national type and CCN-51 and its relationship with climatic factors on the ecuadorian coast. Acta Agrobotanica. 73(2):7323. <http://dx.doi.org/10.5586/aa.7323>
- GONZÁLEZ-OROZCO, C.E.; SÁNCHEZ GALÁN, A.A.; RAMOS, P.E.; YOCKTENG, R. 2020. Exploring the diversity and distribution of crop wild relatives of cacao (*Theobroma cacao* L.) in Colombia. Genetic Resources and Crop Evolution. 67(8):2071-2085. <https://doi.org/10.1007/s10722-020-00960-1>
- INSTITUTO DE HIDROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES, IDEAM. 2017. Indicadores climáticos. Disponible desde Internet en: <http://institucional.ideam.gov.co/jsp/1772>
- JAIMEZ SUÁREZ, Y.; ARANZAZU HERNÁNDEZ, F. 2010. Manejo de las enfermedades del cacao (*Theobroma cacao* L.) en Colombia, con énfasis en monilia (*Moniliophthora roreri*). Colombia. Corpoica. 90p. Disponible desde Internet en: https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/12699/81628_56560.pdf?sequence=3
- JAIMEZ, R.E.; BARRAGÁN, L.; FERNÁNDEZ-NIÑO, M.; WESSJOHANN, L.A.; CEDEÑO-GARCIA, G.; SOTOMAYOR, CANTOS, I.; ARTEAGA, F. 2022. *Theobroma cacao* L. cultivar CCN 51: a comprehensive review on origin, genetics, sensory properties, production dynamics, and physiological aspects. PeerJ. 10:e12676. <https://doi.org/10.7717/peerj.12676>
- KIECK, J.S.; ZUG, K.L.M.; HUAMANÍ YUPANQUI, H.A.; GÓMEZ ALIAGA, R.; CIERJACKS, A. 2016. Plant diversity effects on crop yield, pathogen incidence, and secondary metabolism on cacao farms in Peruvian Amazonia. Agriculture, Ecosystems and Environment. 222:223-234. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2016.02.006>
- KRAUSS, U.; TEN HOOPEN, G.M.; HIDALGO, E.; MARTÍNEZ, A.; STIRRUP, T.; ARROYO, C.; GARCÍA, J.; PALACIOS, M. 2006. The effect of cane molasses amendment on biocontrol of frosty pod rot (*Moniliophthora roreri*) and black pod (*Phytophthora* spp.) of cocoa (*Theobroma cacao*) in Panama. Biological Control. 39:232-239. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2006.06.005>
- LEIVA-ROJAS, E.; GUTIÉRREZ-BRITO, E.E.; PADO-MACEA, C.J.; RAMÍREZ-PISCO, R. 2019. Comportamiento vegetativo y reproductivo del cacao (*Theobroma cacao* L.) por efecto de la poda. Revista Fitotecnia. Mexicana. 42(2):137-146.
- MENA-MONTOYA, M.; GARCÍA-CRUZATTY, L.C.; CUENCA-CUENCA, E.; VERA-PINARGOTE, L.D.; VILLAMAR-TORRES, R.; MEHDI-JAZAYERI, S. 2020. Pollen flow of *Theobroma cacao* and its relationship with climatic factors in the central zone of the ecuadorian littoral. Bioagro. 32(1):9-48.
- MENDOZA-MENESES, C.J.; FERREGRINO-PÉREZ, A.A.; GUEVARA-GONZÁLEZ, R.G.; GARCÍA-TREJO, J.F. 2023. Implementation of pre-harvest techniques in emerging agroforestry systems to increase the yield of cocoa tree (*Theobroma cacao* L.). Heliyon. 9:e14542. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14542>
- MENESES-BUITRAGO, D.H.; BOLAÑOS-BENAVIDES, M.M.; GÓMEZ-GIL, L.F.; RAMOS-ZAMBRANO, H.S. 2019. Evaluation of irrigation and pruning on the phenology and yield of *Theobroma cacao* L. Agronomía Mesoamericana. 30(3):681-693. <https://doi.org/10.15517/am.v30i3.36307>
- MINAGRICULTURA. 2020. Estrategia de ordenamiento de la producción cadena productiva del cacao y su industria. 38p. Disponible desde Internet en: <https://sioc.minagricultura.gov.co/DocumentosContexto/S4128-Plan%20OP%20Cacao%202020.pdf>
- MINAGRICULTURA. 2021. Cadena de cacao. 34p. Disponible desde Internet en: <https://sioc.minagricultura.gov.co/Cacao/Documentos/2021-03-31%20Cifras%20Sectoriales.pdf>

- PRABHAKARAN NAIR, K.P. 2010. Chapter 4 the agronomy and economy of important tree crops of the developing world. En: Sparks, D.L. Advances in Agronomy. Academic Press. 101:131-180. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)00804-3](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)00804-3)
- PUENTES-PÁRAMO, Y.J.; MENJIVAR-FLORES, J.C.; GÓMEZ-CARABALÍ, C.A.; ARANZAZU-HERNÁNDEZ, F. 2014. Absorción y distribución de nutrientes en clones de cacao y sus efectos en el rendimiento. Acta Agronómica. 63(2):145-152. <https://doi.org/10.15446/acag.v63n2.40041>
- RAMÍREZ GIL, J.G. 2016. Pérdidas económicas asociadas a la pudrición de la mazorca del cacao causada por *Phytophthora* spp., y *Moniliophthora roreri* (Cif y Par) Evans et al., en la hacienda Theobroma, Colombia. Revista Protección Vegetal. 31(1):42-49.
- RODRÍGUEZ, S.; RODRÍGUEZ, J.J. 1993. La fertilización de los cultivos: un método racional. Facultad de Agronomía, Pontificia Universidad Católica Chile. 291p.
- RODRÍGUEZ-POLANCO, E.; PARRA-ALFERES, E.B.; BERMEO-FUQUENE, P.A.; SEGURA-AMAYA, J.D.; RODRÍGUEZ-POLANCO, L.A. 2021. Manejo de la pudrición parda de la mazorca (*Phytophthora palmivora*) en cacao por aplicación conjunta de prácticas culturales y químicas. Revista Facultad de Ciencias Básicas. 16(1):79-93. <https://doi.org/10.18359/rfcb.4887>
- ROSAS-PATÍÑO, G.; PUENTES-PÁRAMO, Y.J.; MENJIVAR FLORES, J.C. 2019. Efecto del encalado en el uso eficiente de macronutrientes para cacao (*Theobroma cacao* L.) en la Amazonia colombiana. Revista Ciencia & Tecnología Agropecuaria. 20(1):05-16. https://doi.org/10.21930/rcta.vol20_num1_art:1247
- ROSAS-PATÍÑO, G.; PUENTES-PÁRAMO, Y.J.; MENJIVAR-FLORES, J.C. 2021. Efecto del pH sobre la concentración de nutrientes en cacao (*Theobroma cacao* L.) en la Amazonia Colombiana. Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica. 24(1):e1643. <https://doi.org/10.31910/rudca.v24.n1.2021.1643>
- SENG, J.; HERRERA, G.; VAUGHAN, C.S.; MCCOY, M.B. 2014. Use of *Trichoderma fungi* in spray solutions to reduce *Moniliophthora roreri* infection of *Theobroma cacao* fruits in Northeastern Costa Rica. Revista Biología Tropical. 62(3):899-907. <https://doi.org/10.15517/rbt.v62i3.14059>
- SOSA, E.P.; RAMÍREZ, G.R.G. 2020. Posibles efectos del cambio climático en la región productora de cacao en Tabasco, México. Tlalli. Revista de Investigación en Geografía. (3):39-67. <https://doi.org/10.22201/ffyl.26832275e.2020.3.1069>
- SUÁREZ, J.C.; GELPUD C.; NORIEGA, J.E.; ORTÍZ-MORERA, F.A. 2021. How do different cocoa genotypes deal with increased radiation? An analysis of water relation, diffusive and biochemical components at the leaf level. Agronomy. 11(7):1422. <https://doi.org/10.3390/agronomy11071422>
- TOSTO, A.; MORALES, A.; RAHN, E.; EVERS, J.B.; ZUIDEMA, P.A.; ANTEN, N.P.R. 2023. Simulating cocoa production: A review of modelling approaches and gaps. Agricultural Systems. 206:103614. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2023.103614>
- ZUIDEMA, P.A.; LEFFELAAR, P.A.; GERRITSMA, W.; MOMMER, L.; ANTEN, N.P.R. 2005. A physiological production model for cocoa (*Theobroma cacao*): model presentation, validation and application. Agricultural Systems. 84:195-225. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2004.06.015>



Componentes del rendimiento en tres clones de cacao (*Theobroma cacao* L.) bajo fertilización química fraccionada

Yield components of three cocoa clones (*Theobroma cacao* L.) under fractional chemical fertilization

Danielle Oliveira-de-Andrade^{1*} ; Jaime Torres-Bazurto² ; Daniel Gerardo Cayón-Salinas³ ; Oscar Piamba⁴ ; Lina Maria Alvarado⁵ ; Óscar Darío Hincapié⁶

¹Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Posgrado en Ciencias Agrarias. Palmira - Valle del Cauca, Colombia; e-mail: doliveirad@unal.edu.co

²Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, Facultad de Ciencias Agrarias. Bogotá D.C., Colombia; e-mail: jtorresb@unal.edu.co.

³Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira, Facultad de Ciencias Agropecuarias. Palmira - Valle del Cauca, Colombia; e-mail: dgayons@unal.edu.co.

⁴Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, Facultad de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica. Bogotá D.C., Colombia; e-mail: oepiambat@unal.edu.co.

⁵Universidad del Valle, Investigadora/Asistente de docencia, Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Cali, Colombia; e-mail: alvarado.lina@correounivalle.edu.co.

⁶Compañía Nacional de Chocolates, Investigador de Fomento Agrícola. Colombia; e-mail: odhincapie@chocolates.com.co

*autor de correspondencia: doliveirad@unal.edu.co

Cómo citar: Oliveira-de-Andrade, D.; Torres-Bazurto, J.; Cayón-Salinas, D.G.; Piamba, O.; Alvarado, L.M.; Hincapié, O.D. 2025. Componentes del rendimiento en tres clones de cacao (*Theobroma cacao* L.) bajo fertilización química fraccionada. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 28(1):e2672. <http://doi.org/10.31910/rudca.v28.n1.2025.2672>

Artículo de acceso abierto publicado por Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, bajo una Licencia Creative Commons CC BY-NC 4.0

Publicación oficial de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Institución de Educación Superior Acreditada en Alta Calidad por el Ministerio de Educación Nacional

Recibido: mayo 21 de 2024

Aceptado: junio 10 de 2025

Editado por: Helber Adrián Arévalo Maldonado

RESUMEN

Para propiciar mejores prácticas de fertilización para el cultivo de cacao es indispensable conocer el comportamiento productivo de cada clon para definir la estrategia de manejo nutricional. En esta investigación se evaluó la respuesta productiva de tres clones de cacao (CNCh 12, CNCh 13 e ICS 1), sometidos a cinco tratamientos de fertilización química fraccionada, en un diseño experimental de bloques completos al azar, con cuatro repeticiones. Los tratamientos de fertilización fueron: T0, testigo absoluto; T1, fertilización del agricultor; T3, ajustada para producir tres toneladas por hectárea año; T2, 25 % menos de T3 y T4, 25 % más de T3. Se determinaron las componentes de producción (índices de grano, número de semillas normales por fruto y número de frutos por planta), rendimientos (real y total) y potencial productivo del cultivo. Los resultados mostraron diferencias significativas entre los clones para todas las variables evaluadas, mostrando heterogeneidad entre genotipos. Se observó que los tratamientos de fertilización no tuvieron efecto significativo sobre el índice de grano y el número de granos por mazorca, excepto en el CNCh13. Un efecto más claro se observó en el número de frutos por planta, en que los tratamientos fertilizados tendieron a presentar un aumento con relación al testigo. Este efecto se ve en el rendimiento real y el potencial productivo del cultivo. Algunas fertilizaciones incrementaron la producción del cultivo de cacao para todos los clones evaluados, principalmente, en función del número de frutos y se identificó que los clones presentaron requerimientos específicos de fertilización.

Palabras clave: Concentración de nutrientes en el suelo; Fertilidad del suelo; Granos de cacao; Interacción genotipo ambiente; Producción.

ABSTRACT

To promote better fertilization practices for cacao crops, it is essential to understand the productive performance of clones to define the nutritional management strategy. This study evaluated the productive response of three cacao clones (CNCh 12, CNCh 13, and ICS 1) subjected to five fractional chemical fertilization treatments in a randomized complete block experimental design with four replications. The fertilization treatments were: T0, absolute control; T1, farmer fertilization; T3, adjusted to produce three tons per hectare per year; T2, 25% less than T3; and T4, 25% more than T3. Production components (grain indices, number of normal seeds per fruit, and number of fruits per plant), yields (actual and total), and crop productive potential were determined. The results showed significant differences among clones for all variables evaluated, demonstrating heterogeneity among genotypes. It will be observed that fertilization treatments had no significant effects on the grain index and the number of grains per ear, except in CNCh13. A clearer effect will be observed in the number of fruits per plant, where the fertilized treatments tended to show an increase compared to the control. This effect is evident in the actual yield and productive potential of the crop.

Keywords: Cacao beans; Genotype-environment interaction; Production; Soil fertility; Soil nutrient concentration.

INTRODUCCIÓN

Colombia es uno de los diez mayores productores mundiales de cacao y, actualmente, cuenta con un área sembrada superior a 259,6 mil hectáreas (Macheca-Silva, 2024). La mayor fracción de esta área (36,8 %) se encuentra en el departamento de Santander, que también es el mayor productor del país, según la Federación Nacional de Cacaoteros (2017). La producción nacional en 2021/22 fue alrededor de 69 mil toneladas, aumentando, aproximadamente, 8,9 %, comparado al año anterior; sin embargo, debido a las condiciones presentadas por el fenómeno “La Niña”, en 2022/23, la producción se redujo a 62,1 mil toneladas (Fedecacao, 2023).

Los suelos colombianos sembrados con cacao se caracterizan por ser mayoritariamente ácidos y, por lo general, muy pobres en nutrientes, lo que se convierte en limitante para la producción de cacao (Cuervo-Alzate & Osorio, 2020). Alvim (1977) afirma que cultivos de cacao con una adecuada fertilización pueden alcanzar altas producciones, mientras que en sistemas tradicionales sin fertilización, el rendimiento no alcanza más de 500 kg ha⁻¹ año⁻¹ de granos.

Para producir una tonelada de grano de cacao por hectárea año, un cultivo puede extraer del suelo, cerca de 36 kg de nitrógeno (N), 8 kg de fósforo (P) y 51 kg de potasio (K), además de otros nutrientes (Furcal-Beriguete, 2017). Si los nutrientes tomados del suelo no son restituidos, la fertilidad del suelo se reduce y la producción de cacao declina, como lo demostraron Ahenkorah *et al.* (1974) y Aneani & Ofori-Frimpong (2013). Los requerimientos de nutrientes se suplen utilizando diferentes estrategias de fertilización.

La fertilización química granulada o mediante fertilizante foliar aumenta la productividad del cacao, como lo reporta Arthur *et al.* (2024). El uso de fertilizantes orgánicos también presenta efectos positivos en el aumento de la producción de cacao, como lo reporta Vega *et al.* (2021), en el entorno colombiano. El fraccionamiento de la dosis anual de fertilizante es una técnica que busca reducir las pérdidas de estos y brindar los elementos requeridos en el momento de mayor demanda del cultivo (Puentes-Páramo *et al.* 2014).

El periodo más exigente en términos de nutrientes para el cultivo de cacao es durante el desarrollo del fruto, sobre todo de NPK (Snoeck *et al.* 2016). Las exigencias nutricionales del cultivo pueden variar significativamente en función del material genético, edad, estado fenológico, manejo agronómico, densidad de siembra y ambiente (Puentes-Páramo *et al.* 2014).

De acuerdo con Snoeck *et al.* (2016), para realizar un adecuado manejo de la fertilización es necesario realizar un diagnóstico del suelo, que permita conocer sus niveles críticos de nutrientes, sus relaciones, así como sus balances, para aportarle al suelo lo que el cultivo requiere, para el mantenimiento fisiológico, el crecimiento y la cosecha (Chepote *et al.* 2012). Como complemento, se puede realizar un diagnóstico foliar para identificar deficiencias nutricionales del cultivo y efectuar una evaluación de parámetros físicos del suelo, con el objetivo de identificar, si hay factores

limitantes para la absorción de nutrientes y el desarrollo del cultivo (Russel & Goss, 1974; Silva *et al.* 1977; Sodré, 2002; Reichert *et al.* 2003). Otros aspectos relevantes son la selección de las fuentes y el momento, forma y lugar de aplicación de nutrientes, que se deben realizar respetando las demandas nutricionales de cada etapa fenológica del cultivo (Snoeck *et al.* 2016).

Las investigaciones sobre fertilización y nutrición de cacao en el contexto colombiano son escasas y, además, se desconoce la respuesta a la fertilización de los nuevos clones que se han introducido en el país, con el fin de mejorar el aroma y sabor, en zonas productoras de Santander, zona que se caracteriza por tener un clima apto para el desarrollo de este cultivo, pero con un suelo pobre en fertilidad. Ante lo mencionado, el objetivo de este estudio fue evaluar la respuesta de la fertilización periódica y fraccionada sobre las componentes de rendimiento en tres clones de cacao, en Santander, Colombia.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización de la zona de estudio. El experimento se realizó entre 2020 a 2023, en la Granja Experimental Yariguíes, ubicada a 110 m s.n.m., entre los municipios de Barrancabermeja y San Vicente de Chucurí, Santander, Colombia (N 6 54'30,2", W 73 44'08,3").

Material genético. Se evaluaron clones de fino aroma y autocompatibles, denominados Imperial College Selection (ICS 1) y Compañía Nacional de Chocolates (CNCh) 12 y 13. El cultivo fue establecido en campo en 2011, en tresbolillo, en asocio con abarcos (*Cariniana pyriformis*). El cacao est  sembrado a una distancia de 3,20 x 3,20 m entre plantas y entre surcos, mientras que los abarcos, lo est n a una distancia de 6,40 x 12,80 m entre plantas y entre surcos, respectivamente.

Clima. La zona de vida es definida como bosque húmedo tropical (bh-T), según Holdridge (2000). La media anual de precipitación acumulada es superior a 2.700 mm en régimen bimodal, temperatura del aire de 28  C, humedad relativa de 84 % y brillo solar de 5,5 horas al día (Ideam, 2023).

Suelo. Las parcelas del ensayo se ubicaron en lomas y colinas con pendientes superiores a 25 %. El suelo corresponde a un Typic Udorthents (USDA, 2014). Antes de la implementación del ensayo en campo se determinaron las variables fisicoquímicas del suelo. Las metodologías empleadas son las utilizadas por el Laboratorio de Aguas y Suelos, de la Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia, UNAL y por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi, IGAC; en la tabla 1 se presenta los resultados.

Diseño experimental. Se utilizó un diseño en bloques completos al azar con cinco tratamientos y cuatro repeticiones. La unidad experimental fue conformada por 15 árboles, de los cuales, 6 fueron utilizados para el registro de producción.

Tratamientos (TTO). Definidos como: T0, testigo absoluto; T1, fertilización empleada por el agricultor; T3, ajustada para producir

tres toneladas de granos secos por ha año, tomando en cuenta las extracciones de nutrientes de los granos secos de cacao y las condiciones nutricionales del suelo; T2, 25 % menos de la dosis planteada para T3 y T4, 25 % más de la dosis planteada para T3. En la tabla 2 se presenta las cantidades de nutrientes aplicados.

Fuentes de fertilizantes y fraccionamiento de la dosis. Con la formulación comercial (N – P₂O₅ – K₂O – CaO – MgO) fueron utilizados Agrimins (12-6-27-5-5), enmienda mezcla multipropósito (0-12,6-0-32,5-6,8), cal agrícola (0-0-0-50,4-0) y Multi NPK (13-

3-43-0-0). La dosis anual de Agrimins del T1 fue fraccionado en tres partes iguales, aplicados en febrero, septiembre y noviembre y la enmienda multipropósito fue aplicada en su totalidad en junio. Para los T2, T3 y T4 las dosis fueron fraccionadas y aplicadas de la siguiente forma: Agrimins, en 56,3 (abril) y 43,7 % (septiembre); enmienda multipropósito, en 45,5 (febrero) y 54,5 % (junio); cal agrícola, en 56,1 (febrero) y 43,9 % (junio) y Multi NPK 38,3 (abril) y 61,7 % (septiembre), respectivamente.

Tabla 1. Características físicoquímicas del suelo de la Granja Experimental Yarigués, Santander, donde se estableció el cultivo de cacao con los clones ICS 1 y CNCh 12 y 13.

K	Ca	Mg	Na	P	S	Fe	Mn	Zn	Cu	B
meq/100g				mg/kg						
0,2	4,2	2,0	0,1	14,8	14,2	53,5	24,0	1,8	1,0	0,4
pH	CO %	AI	CIC	CICe	DA	CE	Arcilla	Limo	Arena	Clase textural
meq/100g				g/cm ³		dS/m	%			Franco arcilloso
4,59	0,7	2,59	12,1	8,7	1,66	0,2	36	27	38	

Tabla 2. Cantidad de nutrientes aplicados por tratamiento en kg/ha año.

Tratamiento	N	P	K	Ca	Mg	S	Fe	Mn	Cu	Zn	B
T0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T1	75	43	138	274	62	53	0,31	1,96	0,11	4,0	8,36
T2	118	24	166	18	16	9	0,34	0,50	0,14	0,28	0,25
T3	157	26	185	46	28	12	0,45	1,46	0,15	0,52	0,31
T4	197	32	231	58	35	15	0,56	1,82	0,19	0,65	0,38

T0, testigo absoluto; T1, fertilización del agricultor; T3, ajustada para producir tres toneladas por hectárea año; T2, 25 % menos de T3; y T4, 25 % más de T3.

Conducción del ensayo y manejo agronómico. Implementado el ensayo en campo se procedió a la eliminación de todos los frutos de los árboles seleccionados. Antes de cada fertilización se realizó plateo a cada planta y la forma de aplicación fue en media corona. El manejo agronómico realizado fue el mismo para todos los tratamientos con excepción de la fertilización. La poda se realizó entre febrero a marzo y el cultivo de abarco no recibió ninguna labor agronómica.

Componentes del rendimiento. Un muestreo fue realizado en 2022, se seleccionaron al azar seis frutos por unidad experimental para formar una muestra y sobre ellas se determinaron las siguientes variables:

Número de semillas normales por frutos (NSNF): se desgranó manualmente cada fruto y, posteriormente al tacto, se contabilizaron las semillas.

Índice de grano (IG): todas las muestras anteriores fueron etiquetadas, empacadas, fermentadas y puestas a secar a temperatura ambiente bajo sol. Finalizado el proceso, se midieron las humedades de cada muestra y posteriormente se contabilizó el número de granos y se registró los pesos de cada muestra. Con la ecuación 1, se calculó el IG (Icontec, 2021) y se corrigió su valor para que todas las muestras tuvieran la misma humedad del 7 %.

$$IG(g) = \frac{\text{Peso de la muestra de granos secos (íntegros + pasillas)}}{\text{número de granos de la misma muestra}} \quad \text{ecuación 1}$$

Índice de mazorca (IM): a partir del IG y NSNF, se calculó la cantidad necesaria de frutos para obtener un kg de granos de cacao seco (Icontec, 2021).

Número de frutos por planta (NFP): definido por la suma de frutos cosechados sanos y maduros por planta (NFSP), frutos menores (Nfdmep) y mayores (Nfdmap), a 4 meses descartados por enfermedad o plaga por planta.

Número de frutos totales por planta (NFTP): suma entre Nfdmap y NFSP.

Rendimiento total (RDOT): se estimó mediante el NFTP, NSNF, IG y la densidad de siembra (DS) de 1127 plantas/ha, conforme a la ecuación 2, adaptado de Lachenaud (1995).

$$Rdot \left(\frac{kg}{ha} \right) = \frac{n^{\circ} \text{ de frutos totales}}{\text{planta}} \times \frac{n^{\circ} \text{ de semillas normales}}{\text{fruto}} \times IG \left(\frac{g}{\text{grano}} \right) \times DS \quad \text{ecuación 2}$$

Rendimiento real (RDOR): se estimó mediante la ecuación 2, sustituyendo la variable NFTP por NFSP.

Estimación del potencial productivo del cultivo (EPPC): también se estimó a partir de la ecuación 2, donde se sustituyó el NFTP por NFP.

Análisis estadístico. Se utilizó el software estadístico SAS (SAS Institute Inc., 2024) para el análisis de resultados. Se analizó la normalidad y homocedasticidad de los datos y se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) y la prueba de comparación de medias de Duncan ($\alpha \leq 0,05$). También, se realizó la correlación de Pearson.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Componentes del rendimiento. El conjunto de datos de cada variable siguió una distribución normal. El análisis de varianza ($p \leq 0,05$) no presentó diferencias significativas para NSNF, IG, NFP, NFTP, NFSP, Nfdmap, Nfdmep e IM entre los tratamientos para un mismo clon, con excepción del IG para CNCh 13. Por otra parte, entre los clones, todas estas variables mostraron ser significativamente diferentes.

Tabla 3. Resultados del número de semillas normales por fruto (NSNF) e índice de grano (IG) para cada tratamiento y clon de cacao, en la Granja Experimental Yariquíes, Santander.

	CNCh 12		CNCh 13		ICS 1	
TTO	NSNF	IG	NSNF	IG	NSNF	IG
T0	32 ± 7	1,48 ± 0,1	51 ± 3	1,84 ± 0,1 ^{a*}	36 ± 5	1,63 ± 0,02
T1	33 ± 5	1,54 ± 0,2	51 ± 3	1,84 ± 0,1 ^a	35 ± 5	1,59 ± 0,2
T2	33 ± 5	1,44 ± 0,1	50 ± 5	1,73 ± 0,1 ^b	36 ± 5	1,70 ± 0,1
T3	33 ± 7	1,52 ± 0,1	49 ± 4	1,79 ± 0,1 ^{ab}	37 ± 6	1,73 ± 0,1
T4	31 ± 5	1,43 ± 0,2	50 ± 4	1,74 ± 0,1 ^b	37 ± 4	1,60 ± 0,2
Media	32 ± 3 ^c	1,48 ± 0,1 ^c	50 ± 1 ^A	1,79 ± 0,1 ^A	36 ± 2 ^B	1,65 ± 0,1 ^B
%CV	9,85	5,87	2,99	3,45	4,93	6,66

*valores seguidos de letras minúsculas diferentes en una misma columna difieren entre tratamientos para un mismo clon y por letras mayúsculas entre filas para una misma variable difieren entre clones significativamente ($\alpha < 0,05$), por la prueba de Duncan.

T0, testigo absoluto; T1, fertilización del agricultor; T3, ajustada para producir tres toneladas por hectárea año; T2, 25 % menos de T3; y T4, 25 % más de T3.

Un estudio realizado por Graziani De Fariñas *et al.* (2002), en Venezuela, reporta que el valor NSNF de los clones de cacao criollo, forastero amazónico y trinitario fueron de 27, 36 y 33, respectivamente. En dicho estudio, los cultivos estuvieron sujetos a diferentes manejos agronómicos y no se encontró diferencias significativas para este indicador en función de los tratamientos, pero sí entre las variedades del clon.

Los valores de NSNF e IG observados en este experimento son valores considerados normales, coherentes con los valores reportados para clones considerados elite que, según Icontec (2021), uno de los requisitos es tener un IG mínimo de 1,2 g; por otra parte, Estivarez-Copa & Maldonado-Fuentes (2019) indican que entre los criterios de selección de cacao boliviano considerados promisorios son un NSNF mayor a 29 y un IG mayor 0,85g.

Los mejores valores obtenidos en la presente investigación permiten catalogar los granos como de tamaño medio (1,31 a 1,79g), para CNCh 12 e ICS 1 y alto (>1,8g), para CNCh 13; además, estos valores fueron ligeramente superiores a los reportados por la Agrosavia (2022), en un 2,7, 15 y 1,8 %, para los clones CNCh 12, CNCh 13 y ICS 1, respectivamente.

Este resultado es coherente con los resultados reportados por Cilas *et al.* (2010), quienes identifican que el número de semillas por

Granos. En la tabla 3, se presentan los resultados promedios del NSNF e IG para cada tratamiento y clon. El NSNF e IG fueron significativamente distintos entre los tres clones, según la prueba de Duncan, donde CNCh 13 presentó los mayores valores para estas variables con 50 semillas y 1,79 g, mientras que CNCh 12 presentó los menores valores con 32 semillas y 1,48g, respectivamente. Algunos tratamientos con fertilización presentaron un pequeño incremento no significativo en el NSNF e IG con relación al T0, excepto para CNCh 13. Los tratamientos que presentaron los mejores indicadores para NSNF e IG, fueron: para el clon CNCh 12, el T1 con 33 semillas y 1,54 g; para ICS 1, el T3 con 37 semillas y 1,73 g y para CNCh 13, con T0 y T1 con 51 semillas y 1,84 g. Los resultados de estas variables no evidenciaron el dominio de ningún tratamiento, mientras que el clon CNCh 12 presentó una alta variabilidad en ellas comparado con los demás clones.

fruto depende, principalmente, de la disponibilidad de óvulos en el ovario de la flor, lo que se considera una característica heredable y un descriptor clonal. Existen otros aspectos que inciden sobre el NSNF, como la fertilidad de los óvulos y la compatibilidad entre el polen y los óvulos, en consonancia con lo reportado por Falque *et al.* (1995), quienes afirman que cuanto mayor sea la cantidad de granos de polen por estigma mayor será el número de semillas por fruto.

La masa de semillas del cacao esta correlacionada con factores genéticos, posición del grano en la mazorca y el tiempo de maduración del fruto. Para semillas resultantes de cultivos en condiciones comparables se ha establecido un alto nivel de heredabilidad del IG, como fue reportado por Doaré *et al.* (2020) y Cilas *et al.* (2010), con un indicador $h > 0,7$; factores ambientales pueden intervenir en esta característica, pero en un menor grado. Estos resultados muestran que la respuesta del NSNF e IG atienden más a las condiciones genéticas del material vegetal; no obstante, los nutrientes pueden incidir sobre estas variables, aunque el efecto sea pequeño.

Frutos por planta. En la figura 1, se presentan los resultados promedios anual para NFSP, Nfdmap, NFTP (NFSP + Nfdmaf), Nfdmep y NFP para CNCh 12, CNCh 13 e ICS 1. Los clones ICS1 y CNCh 12 presentaron cantidades similares de frutos formados por planta (NFP), con cerca de 121 y 119 frutos, respectivamente, mientras que CNCh

13 produjo una cantidad significativamente menor, con 33 frutos por planta. Los tratamientos con fertilización incrementaron el NFP, con excepción del T1 para CNCh 12. La mayor producción de frutos para CNCh 12 e ICS 1 se presentó con T4, con 145 y 140 frutos, mientras que el menor valor lo mostró T0, para todos los clones, con 113, 108

y 27 frutos para ICS 1, CNCh 12 y CNCh 13, respectivamente. El NFP está relacionado con las características genéticas del clon (Souza Freitas *et al.* 2025), asociado a la eficiencia en la fecundación de las flores (Ríos-Moyano *et al.* 2023).

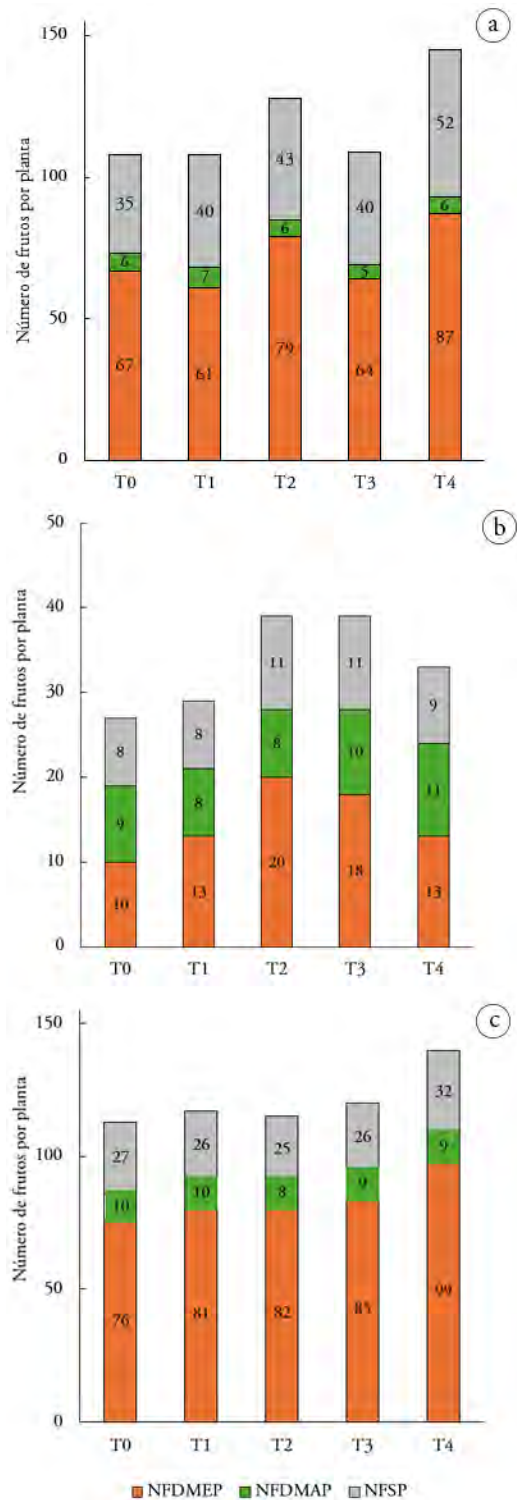


Figura 1. Número de frutos por planta para cada tratamiento y clon de Cacao, en la Granja Experimental Yariguíes, Santander. Clones a) CNCh12, b) CNCh 13 y c) ICS 1.

T0, testigo absoluto; T1, fertilización del agricultor; T3, ajustada para producir tres toneladas por hectárea año; T2, 25 % menos de T3; y T4, 25 % más de T3.

Con relación al NFSP los tres clones mostraron diferencias significativas entre sí; el CNCh 12 presentó un promedio aproximado de 42 frutos sanos por planta, mientras que ICS 1 y CNCh 13 lograron 27 y 9 frutos, respectivamente. Las fertilizaciones aplicadas incrementaron el NFSP para CNCh 12 y CNCh 13 comparado con T0, con excepción del T1 para CNCh 13, mientras que para ICS 1 únicamente el T4 presentó incrementos en el NFSP. El mayor valor de NFSP lo presentó el T4 en los clones CNCh 12 e ICS 1, con 52 y 32 frutos, respectivamente y los T2 y T3 en el clon CNCh 13, con 11 frutos. El aumento del número de frutos en los tratamientos que recibieron fertilización es consecuencia de la disponibilidad de nutrientes en suelo, además de la capacidad de la planta transportar dichos nutrientes (Goudsmit *et al.* 2023).

El clon CNCh 12 presentó una Nfdmap promedio significativamente menor con 6 frutos, que CNCh 13 e ICS 1, ambos con cerca de 9 frutos descartados. Los tratamientos T2, T3 y T4 registraron valores de Nfdmaf menores que T0 para ICS 1. Para CNCh 13 este resultado fue reportado con T1 y T2, que registraron 8 frutos y para CNCh 12 únicamente con T3, con 5 frutos. Con relación al mayor Nfdmap, los clones CNCh 12 e ICS 1 presentaron 7 y 10 frutos con T1, respectivamente, mientras que T4 presentó 11 frutos, para CNCh 13.

El NFTP también presentó diferencias significativas entre los tres clones por la prueba de Duncan; el CNCh 12 presentó 48 frutos, ICS 1 con 36 frutos y CNCh 13 con 19 frutos. Todos los tratamientos presentaron NFTP superiores al T0 para todos los clones, con excepción del T1, para CNCh 13 y los T1 y T2, para ICS 1. El T4 presentó el mayor valor de NFTP para CNCh 12 e ICS 1 con 58 y 41 frutos, respectivamente y los tratamientos que presentaron el menor valor de NFTP fueron T0 para CNCh 12, con 41 frutos; T1 para CNCh 13, con 16 frutos y T2 para ICS 1, con 33 frutos.

Los resultados asociados al CNCh 12 y ICS 1 para NFTP y NFSP fueron similares a los encontrados por Ruales Mora *et al.* (2011), quienes con una alta dosis de fertilizantes registraron la mayor producción de frutos (NFTP y NFSP), con relación al tratamiento sin fertilización para un conjunto de clones; sin embargo, con relación al Nfdmap ellos reportaron un 37,8 % de descartes de frutos, valor superior a los registrados en la presente investigación, para CNCh 12 (12,5 %), para ICS 1 (25 %) y para CNCh 13 (31,6 %).

Los clones CNCh 12 e ICS 1 no presentaron diferencias significativas entre sí para el Nfdmep, con 72 y 84 frutos, respectivamente, pero sus valores fueron distintos al registrado por CNCh 13, con 15 frutos. Todas las fertilizaciones incrementaron el Nfdmep para todos los clones comparado con T0, con excepción de los T1 y T3 del CNCh 12. Los mayores valores de Nfdmep se dieron con T4 para los clones, ICS 1 y CNCh 12, con 99 y 87 frutos, respectivamente, mientras que los menores valores se registraron para T0 en CNCh 13 e ICS 1, con 10 y 76 frutos y CNCh 12 con T1, con 61 frutos.

En promedio se observó que los frutos del cultivo de cacao sobre las condiciones ambientales presentadas durante el ensayo mostraron que solo el 40 % de los frutos que se formaron en CNCh 12, el 57 % en CNCh 13 y 30 % para ICS 1, se alcanzaron a desarrollar, al menos, hasta los 4 meses, siendo las principales causas de estas pérdidas la marchitez de frutos (cherelles) y la incidencia de plagas o enfermedades.

Alvim (1977) indica que la aplicación de nutrientes asociada al aumento de la producción está relacionada a un aumento en la formación de frutos, que puede implicar un incremento de frutos que se marchitan o caen por la incapacidad de la planta para atender las necesidades nutricionales de todos los frutos formados; este comportamiento puede alcanzar hasta un 75 % de los frutos (Melnick, 2016). La afirmación anterior concuerda con los resultados encontrados en la presente investigación, dado que los tratamientos con los mayores incrementos en la formación de frutos también resultaron ser los mismos con el mayor Ndfmep.

Índice de mazorca. El IM fue significativamente distinto entre los tres clones. En promedio, para CNCh 12, este índice fue de 22 frutos; para ICS 1, de 18 frutos y para CNCh 13, de 12 frutos. El menor IM entre tratamientos se presentó con T0 y T1, para CNCh 13 (11), mientras que el mayor valor se registró con T4, para CNCh 12 (23). Según Agrosavia (2022), el IM promedio para CNCh 12, CNCh 13 e ICS 1 son 16, 12 y 17 frutos, respectivamente, valores muy similares a los de la presente investigación, con excepción del CNCh 12, que presentó una media superior a lo informado por ellos.

Producción en granos secos de cacao. La proporción promedio del rendimiento en granos secos de cacao para la cosecha principal fue del 85 % para el CNCh 12; 87,4 % para el CNCh 13 y 87 % para ICS 1, con relación a la cosecha total por año. Estos resultados son importantes, por los momentos de fraccionamiento de la dosis anual, que debe atender la demanda productiva del cultivo.

El análisis de varianza no mostró diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre tratamientos para las variables RDOR, RDOT y EPPC, pero sí entre clones. En la figura 2, se presentan los resultados del rendimiento real, total y el potencial productivo del cultivo por hectárea año.

Rendimiento real. Los resultados mostraron que los clones CNCh 12 (2311,6kg) e ICS 1 (1859,6kg) no presentaron diferencias significativas entre sí con relación al rendimiento real, pero sí fueron distintos del resultado presentado por CNCh 13 (1004,6kg), por la prueba de Duncan. Algunas fertilizaciones incrementaron el RDOR por encima del valor registrado por T0 para todos los clones evaluados. Entre los tratamientos que registraron el mejor RDOR está el T4, que presentó una producción de granos secos de cacao por ha año de 2.701 kg para CNCh 12 y 2.138 kg para ICS 1 y el T2, con 1.163 kg, para CNCh 13. Por otro lado, el T1 presentó los menores valores de RDOR para CNCh 13 (876 kg).

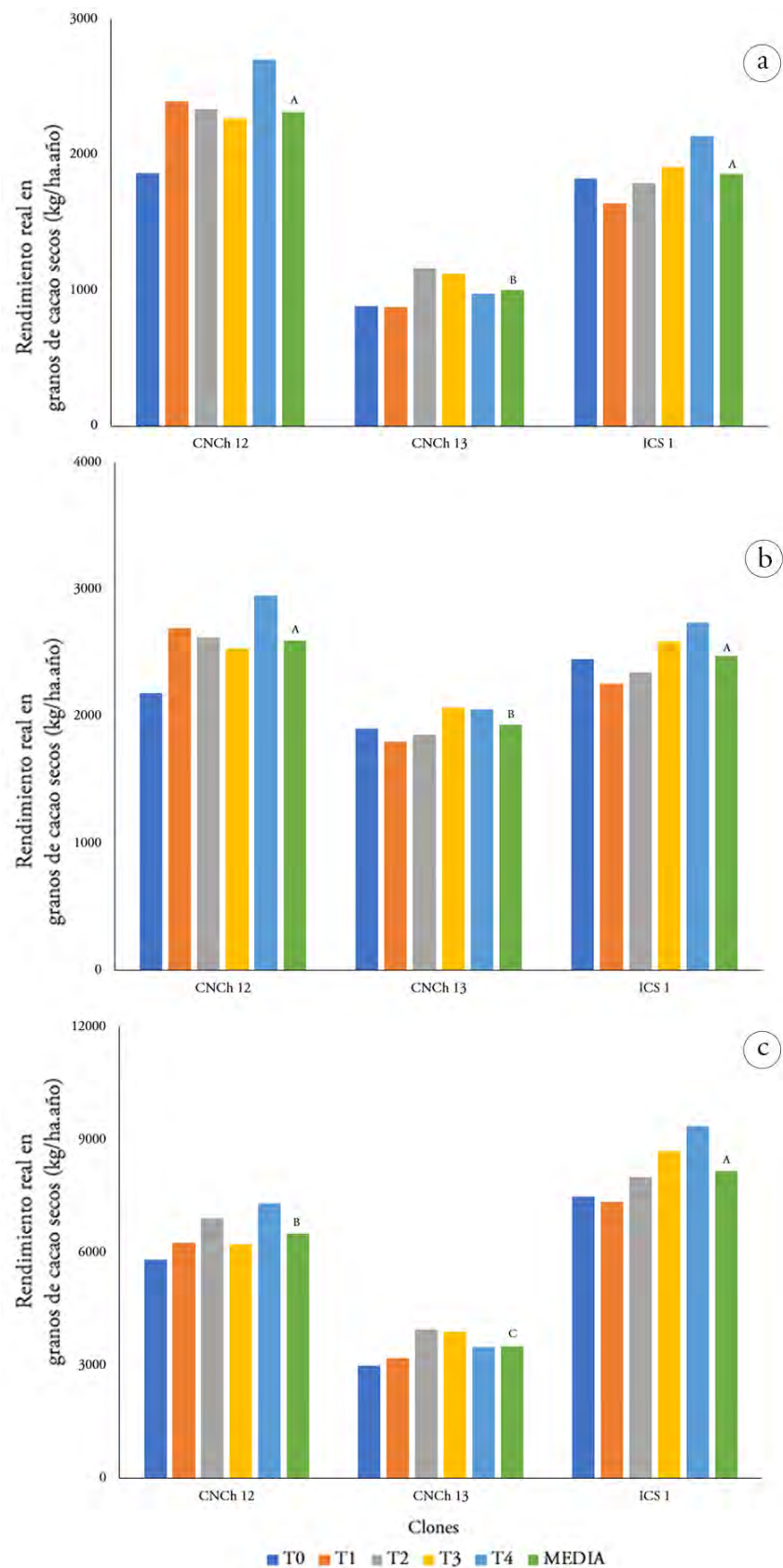


Figura 2. Rendimiento real, total y estimación del potencial productivo para cada tratamiento y clon.

^Avalores acompañados de letras mayúsculas diferentes difieren entre clones y por ^aletras minúsculas difieren entre tratamientos para un mismo clon significativamente ($\alpha < 0,05$), por la prueba de Duncan.
T0, testigo absoluto; T1, fertilización del agricultor; T3, ajustada para producir tres toneladas por hectárea año; T2, 25 % menos de T3; y T4, 25 % más de T3

Rendimiento total. La prueba de Duncan mostró la misma tendencia del RDOR; los valores de RDOT entre CNCh 12 (2.599,6 kg) e ICS 1 (2.477,6 kg) fueron parecidos y diferentes significativamente al encontrado para CNCh 13 (1.936 kg). El T4 registró el mayor RDOT para los clones CNCh 12 (2.953 kg) y el T1 mostró el menor valor para CNCh 13 (1.798 kg) e ICS 1 (1.798 kg) y con T0 para CNCh 12 (2.185 kg). Los tratamientos que registraron los mayores RDOT para los clones evaluados fueron superiores a lo encontrado por Puentes-Páramo *et al.* (2014), quienes reportan rendimientos máximos de 2.020 kg para CCN 51, 1.337 kg para ICS 95, 1.340 kg para TSH 565 y 1.634 kg para ICS 39, que resultaron de fertilizaciones planteadas, a partir de los nutrientes en el suelo.

Los tratamientos de esta investigación se proyectaron esperando producciones totales que superaran los promedios normales. Los resultados asociados al T2, T3 y T4 del clon CNCh 12 alcanzaron 116,6, 84,7 y 78,7 % de la producción deseada, respectivamente, mientras que CNCh 13 fue el que presentó los menores porcentajes para los mismos tratamientos, con 82,4, 69,0 y 54,8 % y para ICS 1, los resultados fueron 104,4 %, para T2; 86,3 %, para T3 y 73,1 %, para T4. Aunque el ensayo estuvo afectado por el fenómeno de “La Niña” durante 2021 y 2022, lo que podría haber interferido en los resultados, es importante mencionar que los tratamientos con los mayores rendimientos son los más eficientes. El T2 mostró más eficiencia en la conversión de nutrientes a masa seca de granos de cacao, a pesar de la menor cantidad de nutrientes y logró producir más de lo proyectado.

Estimación del potencial productivo del cultivo. Los resultados muestran que los tres clones tienen potenciales productivos en granos secos de cacao significativamente distintos entre sí y que el clon ICS 1 (8.178,8 kg) tiene el mayor potencial productivo, seguido del CNCh 12 (6.497 kg) y CNCh 13 (3.507 kg). Con excepción del T1 para ICS 1, todas las dosis de fertilizaciones incrementarían los rendimientos potenciales de estos clones, con relación al T0. El T4 fue el que presentó mayor potencialidad en la formación de frutos para ICS 1 (9.355 kg) y el T2 para CNCh 13 (3.964 kg). Se considera importante enfatizar que esta estimación está condicionada, principalmente, al manejo agronómico que se realizó al cultivo, las características edafoclimáticas y el grado de resiliencia del cultivo en el ambiente que se encuentra; por tanto, dependiendo de las variaciones de estos aspectos, los valores estimados pueden variar en el tiempo.

En general, los clones CNCh 12 e ICS 1 presentaron las mejores producciones con T4, mientras que CNCh 13, con T2. Entre los macronutrientes el N y K fueron los más requeridos para el crecimiento del fruto y los granos de cacao, mientras que el Fe sería el principal micronutriente exigido por los granos (Furcal-Beriguete, 2017; Rosas-Patiño *et al.* 2021). El N es importante porque es componente estructural de moléculas que participan en diversos procesos fisiológicos de la planta (Jadin & Snoeck, 1985); el K es un activador de numerosas enzimas que actúan en la translocación de carbohidratos y participa en los procesos de síntesis de proteínas y de la fotosíntesis (Marschner, 1998) y el hierro es esencial para la

síntesis de la clorofila y se encuentra en la composición de algunas moléculas involucradas en procesos de oxidación y de respiración (Chepote *et al.* 2013).

De acuerdo con los resultados, se puede afirmar que algunos tratamientos incrementaron la producción del cultivo de cacao para todos los clones evaluados, principalmente, en función del número de frutos y se identificó la diferencia en los requerimientos nutricionales de los clones evaluados. Los componentes de producción y los rendimientos fueron significativamente diferentes entre los clones, mostrando que el genotipo es un factor importante para tener en cuenta para el manejo del cultivo del cacao en Santander, Colombia.

Estos resultados sugieren que el manejo de la fertilización, tomando en cuenta la extracción de nutrientes para la producción de granos de cacao, ajustada a las condiciones del suelo y fraccionarla de acuerdo con la demanda productiva del cultivo, es benéfico para la producción de cacao. Además, sugiere que los modelos de siembra del cacao, basado solamente en la compatibilidad sexual de la planta podría estar generando impactos económicos y ambientales, por las diferencias encontradas en el comportamiento productivo de los clones evaluados. Este posible escenario da lugar a la realización de nuevas investigaciones que puedan generar conocimiento sobre el comportamiento productivo de diferentes clones y plantear un diseño de siembra basado en compatibilidad sexual, respuesta productiva y ambiente.

Agradecimientos. Los autores agradecen el apoyo del Laboratorio de Aguas y Suelos, de la Facultad de Ciencias Agrarias, Sede Bogotá (UNAL) y de la Granja Experimental Yariguíes (CNCh). **Conflicto de Intereses:** El manuscrito fue preparado y revisado con la participación de todos los autores, quienes declaramos que no existe ningún conflicto de intereses que ponga en riesgo la validez de los resultados presentados. **Financiación:** Parte de este estudio fue financiado por el Ministerio de Ciencias y Tecnología de Colombia (Contracto n° 044-2018, Convocatoria n° 757 de 2016) y por CNCh. **Contribución de autores:** Danielle Oliveira de Andrade: adquisición de fondos, metodología, conceptualización, curación de datos, investigación, redacción, validación, revisión y edición; Jaime Torres-Bazurto: adquisición de fondos, supervisión, revisión, redacción e investigación; Daniel Gerardo Cayón-Salinas: supervisión, redacción y revisión; Oscar Piamba: adquisición de fondos, conceptualización, análisis formal, edición, curación de datos, metodología y revisión; Lina María Alvarado: metodología, curación de datos, validación, análisis formal; Óscar Darío Hincapié: investigación y adquisición de fondos.

REFERENCIAS

- AHENKORAH, Y.; AKROFI, G.; ADRI, A. 1974. The end of the first cocoa shade and manurial experiment at the Cocoa Research Institute of Ghana. *Journal of Horticultural Science*. 49(1):43-51. <https://doi.org/10.1080/00221589.1974.11514550>

- ALVIM, P.T. 1977. Cacao. En: Alvim, P.T.; Kozłowski, T.T. (eds). *Ecophysiology of tropical crops*. Ed. Academic Press. p.279-313. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-055650-2.50015-0>
- ANEANI, F.; OFORI-FRIMPONG, K. 2013. An analysis of yield gap and some factors of cocoa (*Theobroma cacao*) yields in Ghana. *Sustainable Agriculture Research*. 2(4):117-127. <https://doi.org/10.5539/sar.v2n4p117>
- ARTHUR, A.; DOGBATSE, J.A.; PADI, F.K. 2024. Impact of fertiliser application on cocoa yields in Ghana: An analysis of cocoa bean yields in farmers' plantations. *Australian Journal of Crop Science*. 18(3):139-144. <https://doi.org/10.21475/ajcs.24.18.03.PNE3958>
- CHEPOTE, R.E.; SANTANA, S.O.; ARAUJO, Q.R.; SODRÉ, G.A.; REIS, E.L.; PACHECO, R.G.; MARROCOS, P.C.L.; SERÔDIO, M.H.C.F.; VALLE, R.R. 2012. Aptidão Agrícola e fertilidade de solos para a cultura do cacaueiro. En: Valle, R.R. (ed). *Ciência, tecnologia e manejo do cacaueiro*. Ed. CEPLAC. Brasília. 67-113p.
- CHEPOTE, R.E.; SODRÉ, G.A.; REIS, E.L.; PACHECO, R.G.; MARROCOS, P.C.; VALLE, R.R. 2013. Recomendações de corretivos e fertilizantes na cultura do cacaueiro no sul da Bahia. *Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*. 41p.
- CILAS, C.; MACHADO, R.; MOTAMAYOR, J.C. 2010. Relations between several traits linked to sexual plant reproduction in *Theobroma cacao* L.: Number of ovules per ovary, number of seeds per pod, and seed weight. *Tree Genetics & Genomes*. 6:219-226. <https://doi.org/10.1007/s11295-009-0242-9>
- CORPORACIÓN COLOMBIANA DE INVESTIGACIÓN AGROPECUARIA, AGROSAVIA. 2022. Modelo productivo para el cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) en el departamento de Santander. 2ed. Ed. Agrosavia. 184p.
- CUERVO-ALZATE, J.E.; OSORIO, N.W. 2020. Gypsum incubation tests to evaluate its potential effects on acidic soils of Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*. 73(3):9349-9359. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v73n3.85259>
- DOARÉ, F.; RIBEYRE, F.; CILAS, C. 2020. Genetic and environmental links between traits of cocoa beans and pods clarify the phenotyping processes to be implemented. *Scientific Reports*. 10:9888. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-66969-9>
- ESTIVAREZ-COPA, M.E.; MALDONADO-FUENTES, C. 2019. Criterios de selección para cacao nacional Boliviano (*Theobroma cacao* L.), en Alto Beni-Bolivia. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*. 6(2):29-36.
- FALQUE, M.; VINCENT, A.; VAISSIERE, B.E.; ESKEs, A.B. 1995. Effect of pollination intensity on fruit and seed set in cacao (*Theobroma cacao* L.). *Sexual Plant Reproduction*. 8:354-360. <https://doi.org/10.1007/BF00243203>
- FEDERACIÓN NACIONAL DE CACAOTEROS, FEDECACAO. 2017. Disponible desde Internet en: <http://www.fedecacao.com.co/portal/index.php/es/2015-02-12-17-20-59/nacionales>
- FEDERACIÓN NACIONAL DE CACAOTEROS, FEDECACAO. 2023. Producción cacaotera presentó una reducción del 10% en 2022 por lluvias. Disponible desde Internet en: <https://www.fedecacao.com.co/post/a%C3%B1o-cacaotero-2021-2022-cierra-con-descenso-en-producci%C3%B3n-por-intensas-lluvias>
- FURCAL-BERIGUETE, P. 2017. Extracción de nutrientes por los frutos de cacao en dos localidades en Costa Rica. *Agronomía Mesoamericana*. 28(1):113-129. <https://doi.org/10.15517/am.v28i1.23236>
- GOUDSMIT, E.; ROZENDAAL, D.M.; TOSTO, A.; SLINGERLAND, M. 2023. Effects of fertilizer application on cacao pod development, pod nutrient content and yield. *Scientia Horticulturae*. 313:111869. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.111869>
- GRAZIANI DE FARIÑAS, L.G.; ORTIZ DE BERTORELLI, L.O.; ANGULO, J.; PARRA, P. 2002. Características físicas del fruto de cacaos tipos criollo, forastero y trinitario de la localidad de Cumboto, Venezuela. *Agronomía Tropical*. 52(3):343-362.
- HOLDRIDGE, L.R. 2000. *Ecología basada en zonas de vida*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, Costa Rica. 5ed.
- INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIONES, ICONTEC. 2021. Norma Técnica Colombiana, NTC 1252. Cacao en grano. Especificaciones y requisitos de calidad. 6ed. 57p.
- INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES, IDEAM. 2023. Atlas climatológico de Colombia: 2009 a 2023. Santander. Disponible desde Internet en: <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasClimatologico.html>
- JADIN, P.; SNOECK, J. 1985. La méthode du diagnostic sol pour calculer les besoins en engrais des cacaoyers. *Café, Cacao, Thé*. 29(4):255-266.
- LACHENAUD, P. 1995. Variations in the number of beans per pod in *Theobroma cacao* L. in the Ivory Coast. II. Pollen germination, fruit setting and ovule

- development. *Journal of Horticultural Science*. 70(1):1-6. <https://doi.org/10.1080/14620316.1995.11515266>
- MACHECA-SILVA, L. 2024. Resultados preliminares evaluaciones agropecuarias municipales. UPRA. Bogotá. 9p. Disponible desde Internet en: https://upra.gov.co/es-co/Evas_Documentos/BolEVADic.pdf.
- MARSCHNER, H. 1998. Mineral nutrition of higher plants. Segunda edición. Ed. Academic Press Estados Unidos de América. 651p.
- MELNICK, R.L. 2016. Cherelle wilt of cacao: A physiological condition. En: Bailey, B.A.; Meinhardt, L. W. (Ed.). Cacao diseases: A history of old enemies and new encounters. Springer. p.483-499.
- PUENTES-PÁRAMO, Y.J.; MENJIVAR-FLORES, J.C.; GÓMEZ-CARABALÍ, A.; ARANZAZU-HERNÁNDEZ, F. 2014. Absorción y distribución de nutrientes en clones de cacao y sus efectos en el rendimiento. *Acta Agronómica*. 63(2):145-152. <https://doi.org/10.15446/acag.v63n2.40041>
- REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; BRAIDA, J.A. 2003. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. *Revista Ciência & Ambiente*. 27:29-48.
- RÍOS-MOYANO, D.K.; RODRÍGUEZ-CRUZ, F.A.; SALAZAR-PENÁ, J.A.; RAMÍREZ-GODOY, A. 2023. Factores asociados a la polinización del cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.). *Agronomía Mesoamericana*. 34(3):52280. <https://doi.org/10.15517/am.2023.52280>
- ROSAS-PATÍÑO, G.; PUENTES-PÁRAMO, Y.J.; MENJIVAR-FLORES, J.C. 2021. Efecto del pH sobre la concentración de nutrientes en cacao (*Theobroma cacao* L.) en la Amazonia Colombiana. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*. 24(1):e1643. <https://doi.org/10.31910/rudca.v24.n1.2021.1643>
- RUALES MORA, J.L.; BURBANO ORJUELA, H.; BALLESTEROS P, W. 2011. Efecto de la fertilización con diversas fuentes sobre el rendimiento de cacao (*Theobroma cacao* L.). *Revista de Ciencias Agrícolas*. 28(2):81-94.
- RUSSEL, R.S.; GOSS, M.J. 1974. Physical aspects of soil fertility: The response of roots to mechanical impedance. *Netherland Journal of Agriculture Science*. 22:305-318. <https://doi.org/10.18174/njas.v22i4.17215>
- SAS. 2024. Software de análisis estadístico. SAS OnDemand for Academics. SAS Institute Inc. Cary, NC, USA. Disponible desde Internet en: https://www.sas.com/en_us/home.html
- SILVA, L.F. DA; PEREIRA, C.P.; MELO, A.A.O. 1977. Efeito da compactação do solo no desenvolvimento de plântulas de cacau (*Theobroma cacao* L.) e na penetração de raízes. *Revista Theobroma*. 7(1):13-19.
- SNOECK, D.; KOKO, L.K.; JOFFRE, J.; BASTIDE, P.; JAGORET, P. 2016. Cacao nutrition and fertilization. En: Lichtfouse, E. (Ed). Sustainable agriculture reviews. Volumen 19. Ed. Springer International Publishing. p.155-202. https://doi.org/10.1007/978-3-319-26777-7_4
- SODRÉ, G.A. 2002. Uso do desvio padrão para estimativa do tamanho de amostra de plantas de cacau (*Theobroma cacao* L.) em estudos de nutrição. *Agrotrópica*. 13(3):145-150.
- SOUZA FREITAS, L.; SANTOS SILVA, G.; CONCEIÇÃO DOS SANTOS, I.; REIS FERREIRA, A.C.; SILVA SANTOS, L.E.; UMAHARAN, P.; MOTILAL, L.A.; CALLE-BELLIDO, J.; ZHANG, D.; CÔRREA, R.X.; AHNERT, D. 2025. Elite cacao clonal cultivars with diverse genetic structure, high potential of production, and good organoleptic quality are helping to rebuild the cocoa industry in Brazil. *International Journal of Molecular Sciences*. 26(7):3386. <https://doi.org/10.3390/ijms26073386>
- UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE, USDA. 2014. Claves para la taxonomía del suelo. Servicio de Conservación de Recursos Naturales. 12ed. Estados Unidos de América. 399p.
- VEGA, C.A.; TORRES-BAZURTO, J.; BARRIENTOS-FUENTES, J.C.; MAGNITSKIY, S.; BALAGUERA-LÓPEZ, H.E. 2021. Efecto de la fertilización orgánica y la poda sobre la producción de cacao en Cundinamarca, Colombia. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*. 24(2):e1818. <https://doi.org/10.31910/rudca.v24.n2.2021.1818>

Visual, olfactory, and nutritional stimuli of basil (*Ocimum basilicum* L.) in *Tetragonisca angustula* (Hymenoptera: Apidae)

Estímulos visuales, olfativos y nutricionales de la albahaca (*Ocimum basilicum* L.) en *Tetragonisca angustula* (Hymenoptera: Apidae)

Julitza M. Fuentes-Polo^{1*} ; Samuel D. Toncel-Pérez¹ ; Nataly de-la-Pava-Suarez¹ 

¹Universidad del Magdalena. Facultad de ingeniería, Programa ingeniería agronómica, Laboratorio de entomología. Santa Marta, Magdalena – Colombia. e-mail: julitza fuentesmp@unimagdalena.edu.co; samuelt oncel dp@unimagdalena.edu.co; ndelapava@unimagdalena.edu.co

*corresponding author: fuentesjulitza18@gmail.com

How to cite: Fuentes-Polo, J.M.; Toncel-Pérez, S.D.; De-la-Pava-Suarez, N. 2025. Visual, olfactory, and nutritional stimuli of basil (*Ocimum basilicum* L.) in *Tetragonisca angustula* (Hymenoptera: Apidae). Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 28(1):e2654. <http://doi.org/10.31910/rudca.v28.n1.2025.2654>

Open access article published by Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, under a Creative Commons CC BY-NC 4.0 License.

Official publication of the Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, a Higher Education Institution Accredited of High Quality by the Ministry of National Education.

Received: May 8, 2024

Accepted: May 23, 2025

Edited by: Helber Adrian Arévalo Maldonado

ABSTRACT

Bees are essential pollinators that use visual and olfactory stimuli to locate flowers in search of nutritional resources. Among flowering plants, aromatics are recognized for their medicinal properties, but little is known about the mechanisms involved in their interaction with floral visitors. This work aimed to determine how visual and olfactory stimuli of the basil flowers participate in attracting *Tetragonisca angustula* Illiger (1806), and how microorganisms associated with these flowers are involved. For this, the attraction of bees was evaluated according to the type of flower and the resource offered (nectar, pollen, or nectar + microorganisms), and the bees' attraction to the plant's volatiles was analyzed, evaluating plants with and without flowers and the attraction to the isolated microorganisms in them. During the first phase (visual), *T. angustula* bees preferred white panicle-shaped flowers and the nectar resource. In the second phase (olfactory), they chose flowering plants over non-flowering ones. When plants were offered together with isolated microorganisms, bees preferred the smell of the microorganisms over the smell of the plants with flowers. The attraction of *T. angustula* to basil plants is influenced by the structure and color of the flowers, as well as by the volatiles, and especially by the presence of microorganisms in them, despite primarily seeking nectar as a resource during the visit.

Keywords: Epiphytic microorganisms; Insect behavior; Sensory cues; Semiochemicals; Stingless bees.

RESUMEN

Las abejas son importantes polinizadores que, mediante el uso de estímulos visuales y olfativos, localizan flores en busca de recursos nutricionales. Entre las plantas, las aromáticas se reconocen por sus propiedades medicinales, pero poco se conoce sobre los mecanismos que participan en la interacción con sus visitantes florales. Este trabajo tuvo como objetivo determinar cómo los estímulos visuales y olfativos de las flores de albahaca participan en la atracción de *Tetragonisca angustula* Illiger (1806) y cómo en esta interacción participan los microorganismos asociados a las flores. Para esto, se evaluó la atracción de las abejas de acuerdo con el tipo de flor y recurso ofrecido (néctar, polen o néctar + microorganismos) y se analizó la atracción de la abeja a volátiles de la planta, evaluando plantas con y sin flores, y la atracción hacia los microorganismos aislados en las mismas. Durante la primera fase (visual) las abejas de *T. angustula* prefirieron las flores blancas en forma de panícula y los recursos de néctar; En la segunda fase (olfativa) eligieron plantas con flores sobre aquellas que no tienen. Cuando se ofrecieron las plantas junto con microorganismos aislados, las abejas prefirieron el olor de los microorganismos sobre el olor de las plantas con flores. La atracción de *T. angustula* a plantas de albahaca se ve influenciada por la estructura y color de las flores, así como por los volátiles emitidos y, especialmente, por la presencia de microorganismos en ellas, a pesar de que mayoritariamente buscan néctar como recurso durante la visita.

Palabras clave: Abejas sin aguijón; Comportamiento de los insectos; Microorganismos epífitos; Semioquímicos; Señales sensoriales.

INTRODUCTION

Bees are crucial in maintaining ecosystem functionality and stability (Ollerton, 2017). Through their interactions with plants, they not only secure essential food resources but also facilitate the pollination of a diverse array of flora, encompassing various shapes, colors, and sizes. This pollination process is crucial to produce many foods consumed by humans, underscoring the importance of conserving plant biodiversity (Klein *et al.* 2007).

Pollinating insects exhibit a range of social structures, from solitary lifestyles to complex communal systems (Michener, 2007). Among social bee species, *Apis mellifera* is the most recognized pollinator worldwide. Its prominence stems from its generalist foraging behavior, ease of management, and capacity for large-scale transportation, making it indispensable in commercial agriculture (Hung *et al.* 2018).

However, stingless bees, belonging to the tribe Meliponini, also play a vital role in pollination, especially in tropical regions. They are responsible for pollinating a substantial proportion of tropical plant species, both in native forests and agricultural settings (Slaa *et al.* 2006). Notably, *Tetragonisca angustula* (Illiger, 1806) is among the most utilized species in meliponiculture and serves as an effective pollinator for various plants, collecting essential nutrients such as proteins, minerals, fats, and oils through the gathering of water, nectar, and pollen (Ocaña-Cabrera *et al.* 2022).

Bees are highly attuned to visual and olfactory stimuli, which are essential for recognizing floral traits and navigating their environment (Giurfa, 2013). Visual cues, such as flower color and pattern, play a crucial role in long-distance attraction, enabling bees to effectively detect and discriminate between floral resources (Hempel de Ibarra *et al.* 2022). Among the reported stimuli for bees, those that generate the most significant attraction response at long distances are visual, such as the shape and color of flowers (Parra, 2001). Plant volatiles, which are compounds that give the olfactory profile of plants, play a significant role at short distances (Moré *et al.* 2010). In general, both visual and chemical (volatile) stimuli are signals of nutritional rewards, such as pollen or nectar, offered by plants to attract pollinators (Asociación española de Entomología, Jardín Botánico Atlántico y Centro Iberoamericano de la Biodiversidad, 2002).

In plants of the *Ocimum* genus, the presence of chemical compounds such as eugenol, linalool, trans-cinnamate methyl, geraniol, and thymol have been confirmed (Murillo Perea & Viña Patiño, 1999; Murillo *et al.* 2004; González-Zúñiga *et al.* 2011). Some of these compounds exhibit allelopathic effects, pesticide properties, or acaricide effects (Hüe *et al.* 2015; Silva Lima *et al.* 2018).

Pollinators, in the stage of resource recognition in plants, also interact with microorganisms present in the aerial part of the plants they visit, which can positively or negatively modify their behavior (Menzel, 2001). In plants, the habit of microorganisms also depends on the site they inhabit, as some are hosted in vascular tissues

(endophytes) where they obtain enough resources to establish a mutualistic symbiosis and protect the plant (Germaine *et al.* 2004; Tsavkelova *et al.* 2007), while others remain in the aerial part or phyllosphere of plants (epiphytes) and are constantly exposed to abiotic factors and relationships with pathogens (Granados-Sánchez, 2003).

The mutualistic relationship between plants and pollinators is intricate due to plants' morphological and physiological variability, including flower parts such as sepals, petals, stamens, and carpels. These elements attract pollinators like bees, either through the resources they offer, such as nectar, pollen, oils, and resins, or through their colors, smell, shapes, and sizes (Aizen *et al.* 2002). In this interaction, the participation of microorganisms, as mentioned earlier, also plays a crucial role, resulting in either mutualistic or antagonistic relationships depending on the interacting agent (De Bruyner & Baker, 2008).

Therefore, the aim of this study was to elucidate the factors involved in the bee-plant interaction, evaluating visual, olfactory, and nutritional stimuli, as well as possible associated microorganisms that participate in the selection of plants by *Tetragonisca angustula*.

MATERIALS AND METHODS

To evaluate the behavioral responses of *Tetragonisca angustula* to stimuli associated with white basil plants, fifty cuttings of the lemon variety (*Ocimum basilicum* L. 1753) were planted in rooting trays. These plants were kept in trays with peat as a substrate for 15 days. After this period, the cuttings were transplanted into polyethylene bags. A mixture of river sand, rice husk, and worm humus in a 1:1:1 ratio was used as substrate for transplantation. The polyethylene bags were placed in a greenhouse (3.96 m long, 3.83 m wide, 2.93 m high) in the experimental farm of the Universidad del Magdalena in Santa Marta (N 11°13' 24", W 74°11' 2.3").

Plants were enclosed in white mesh boxes to prevent insect damage that could alter metabolites emitted by the selected plants for olfactory stimulus analysis. Additionally, a single fertilization with triple 15 (NUTRIMON) (dose: 5 grams per plant) was performed 10 days after transplantation. Finally, the plants were ready for the bioassays. According to the Köppen-Geiger classification (1961), the area where this study was conducted corresponds to BSh local steppe climate.

Recognition and extraction of microorganisms associated with basil plants. To identify epiphytic and/or endophytic microorganisms associated with basil flowers (*Ocimum basilicum*), isolations were carried out in the plant pathology laboratory of the Universidad del Magdalena. In this study, 40 complete basil flowers were selected. Four isolation treatments were established using different floral structures to evaluate the presence of microorganisms: complete flowers with superficial washing with sterile water (Treatment 1), macerated washed complete flowers (Treatment 2), unwashed petals (Treatment 3), and unwashed stamens (Treatment 4). Two replicates of each treatment were performed using five flowers. All plant

material was previously washed with distilled water. The procedure for Treatment 2 was based on the methodology of Stone *et al.* (2004) and Photita *et al.* (2004).

After planting each structure on nutrient agar, two purifications were carried out for each treatment using four types of agars: nutrient agar (Purification 1), potato nutrient agar (Purification 2 and 3), and soy nutrient agar (Purification 4). Purifications were carried out using the streak plate method for bacteria and direct seeding for fungi (Clarke *et al.* 2018).

Microbiological sample analysis. An initial seeding was carried out, and from there, purifications were performed until obtaining the pure strain in each Petri dish. The samples were identified through microscope mounts, using Gram staining for bacteria and lactophenol blue staining for fungi. The physical data of each sample, such as color, shape, elevation, and margin, were recorded. This was done to identify the present fruiting bodies, following an illustrated guide to fungi and plant pathology (Koneman & Dowell, 1989; Cañedo & Ames, 2004; Agrios, 2005).

Behavioral Bioassays. Stage 1. Evaluation of learning. The bees used to evaluate their behavioral response to each stimulus were taken from the meliponary of the experimental farm of the Universidad del Magdalena. They were kept isolated in their hive within a greenhouse (3.96 m long, 3.83 m wide, 2.93 m high), mounted on a wooden structure (80 cm wide, 160 cm long), preventing them from having previous olfactory and/or visual experiences associated with basil plants that were being cultivated nearby for this specific experiment. Before evaluating the bees' attraction to basil plant stimuli, they underwent training in an observation arena to establish the foraging area, where the resources to be evaluated would be offered. For this stage, the hive was placed at one right end corner of the wooden structure inside the greenhouse. Two Petri dishes with a 1:1 water solution with sugar (changed daily) were placed in the other right corner and in one left corner. Observations were made, measuring the number of visits for four hours (9:00 am -11:00 am and 3:00 pm -5:00 pm) for five days to assess the bees' learning level towards that stimulus and understand their response to the food source. After the learning phase, activities were carried out to evaluate stimuli provided by the basil plant.

Stage 2. Evaluation of visual stimuli. Nine treatments were evaluated in the observation arena, using three flower shapes (emulating form to panicle, solitary flower, simple leaf) and three colors (white, green, and purple), made with Eppendorf tubes filled with gauze with a sugar-water solution (1:1) and surrounded by foam to emulate the basil flower, with a size of 4 cm in height, 7 cm in diameter. Treatments to determine visual stimuli (color and shape) were distributed as follows; for treatments 1, 2, 3 (control), purple flowers were used in the three previously described forms, for treatments 4, 5, 6, green flowers were used, and for treatments 7, 8, 9, white flowers were used. Each treatment had ten repetitions in the observation arena, and five experiment replicates (each replicate representing one day of setup). In each replicate, the treatments were position changed to eliminate the possible influence of abiotic factors and the learning

factor associated with the location on the insect's behavioral response. Observations were made during three periods of the day (7:00 am – 9:00 am, 11 am - 1:00 pm, 3:00 pm – 5:00 pm). The bee's arrival at the flower, followed by the extension of the glossa for feeding, was considered a positive response to the stimulus.

Stage 3. Association of nutritional rewards with visual stimuli of basil plants. Starting from the visual stimulus with the highest number of visits obtained in stage 2 and following the methodology from the previous stage, nine treatments with ten repetitions in the observation arena and five replicates (days of assembly) were established. The aim was to observe the relationship between the bees' visit and the nutritional reward offered by the plant (pollen or essential oil), including two microorganisms frequently isolated from the floral structures of basil in the treatments. This aimed to evaluate their effect on attraction to the plant. Nine treatments were designed with three attractant bases: (1) T1-T3 used water + sugar (1:1), with T1 as control, T2 adding *Aspergillus* sp.1, and T3 adding *Aspergillus* sp.2; (2) T4-T6 replaced the base with basil essential oil extracted from basil leaves (T4:control, T5: +sp. 1, T6: +sp.2); (3) used pollen solution (T7:control, T8: +sp. 1, T9: +sp.2) maintaining the same microorganism sequence across group.

The extraction and preparation of the solutions of the two microorganisms involved taking two strains, each with a different morphology but belonging to the same genus (*Aspergillus* sp.). To each strain, 10 ml of sterile water was added to remove all the fruiting bodies to the culture medium using a microbiological loop. The material was gently scraped, deposited in two 80 ml beakers, covered with aluminum foil, and then the conidia count was performed using the hemocytometer test with the Neubauer chamber (Vélez *et al.* 1997). This determined the concentration of conidia in a suspension, obtaining the same quantity of conidia/ml for each microorganism. The treatments with microorganisms were standardized based on a concentration of 1,000,000 conidia/ml, achieved by adding 0.06 ml and 0.08 ml of the mother solution of microorganisms 1 and 2, respectively.

For the treatment with pollen-supplemented flowers, daily collections of 120 inflorescences provided pollen for treatments T7-T9. After anther excision: T7 received 1 mL sterile water (control), T8 was supplemented with 1 mL *Aspergillus* sp.1 suspension (1×10^6 conidia/mL), and T9 with 1 mL *Aspergillus* sp.2 suspension (equal concentration), all deposited in individual Eppendorf tubes with standardized pollen quantities. Finally, for treatments involving the incorporation of essential oils, 1 ml of ml extract was obtained from basil cuttings using 96% ethanol, excluding the floral area. It is important to note that this extract may not consist solely of essential oils, but rather a mixture of compounds, including both volatile and non-volatile substances extracted by ethanol.

Evaluation of olfactory stimuli. To assess the responses of the angelita bee (*T. angustula*) to olfactory stimuli from basil plants (*Ocimum basilicum*), an air flow olfactometer was designed following the methodology described by López-Ávila & Rincón (2006). The system circulated air provided by a compressor, which passed

through an activated charcoal filter to ensure the cleanliness of the air entering the system. After the adaptation and establishment of the olfactometer located in a greenhouse, the behavior of the bee was evaluated concerning different olfactory stimuli from basil. The Bees used in the experiments were taken from a hive belonging to the Meliponario of the Universidad del Magdalena. These bees had no prior training and were taken directly from the hive entrance.



Figure 1. Olfactometer adapted with two chambers to study the interaction between *Tetragonisca angustula*, *Ocimum basilicum*, and the microorganisms associated with *O. basilicum*.

Initially, the attractiveness of basil plants in vegetative development or flowering phase was analyzed using the following treatments (phase 1): T0 = Plant without flowers (Arm 1) vs. pure air (Arm 2), T1 = Basil plant with flowers (Arm 1) vs. pure air (Arm 2), and T2 = Basil plant with flowers (Arm 1) vs. basil plant without flowers (Arm 2).

Considering the results of the previous stage, we proceeded to analyze whether the bee's attraction to the plant is generated by the mixture of volatiles emitted by the plant and its associated microorganisms, or only by the volatiles emitted by one of the microorganisms found in greater proportion in the floral structures of the plant (phase 2). The treatments always contrasted the attraction of the selected plant vs. the microorganisms as follows: T0: Culture medium with microorganism 1, T1: Culture medium with microorganism 2, and T2: Culture medium with microorganisms 1 and 2.

For each treatment, 20 bees were used as replicates, evaluated between 9:00 am and 12:00 pm, considering this as the time with the highest activity of *T. angustula* according to the learning evaluation results (stage 1). Bees were introduced one at a time, disconnecting the pump and placing the individual in the center of the olfactometer. After reconnecting the pump, the female received the stimulus, and it was observed until it chose one of the two arms or for a maximum of five minutes, after which it was removed. After removing each bee, the tube was cleaned with 70% alcohol to eliminate any possible traces left by the previous individual. Subsequently, it was allowed to dry before testing the next bee. The odor sources (treatments) were changed to the opposite arm after testing five individuals to correct any unforeseen asymmetry

The olfactometer was adapted for choice experiments to use only two chambers (Figure 1), each containing different odor sources according to each treatment. The air flow laminar velocity in each arm was calibrated using anemometers (AMPROBE TMA-20HW). The arms were covered with black fabric to prevent bees from having an additional stimulus other than olfactory.

in the experimental setup. At the end of each treatment, the system was cleaned with hexane, allowing it to pass through the cylinders and arms for 20 minutes, avoiding any interference from residual odors from previous treatments.

Statistical analysis. To analyze bees' behavioral response to visual and nutritional stimuli and evaluate their learning response, a generalized linear model (GLM) with a Poisson distribution (Link = log) was used, adjusting the error distribution with quasi-Poisson distribution when necessary. The explanatory variables were the time of day and nutritional treatments. A contrast analysis within a GLM was conducted for each level of these variables to assess differences between the means of the explanatory variables.

A generalized linear model (GLM) with a binomial distribution (link = logit) was employed for the attraction response of bees to volatiles from both plants and microorganisms. The explanatory variables were the phenology plant stages and the microorganisms from the isolation phase, and the evaluated variable was the attraction response of *T. angustula*. The significance of the variables in all analyses was obtained as follows: first, we compared complex models with simpler ones obtained by combining levels of the variables; if simplification did not result in significant changes, the simpler model was accepted, maintaining the principle of parsimony (Crawley, 2012). After evaluating all models, they underwent a residual analysis to verify that the model was appropriate and that the error distribution was normal. For all analyses, an $\alpha = 0.05$ was considered to assess the statistical significance of variables. All analyses were conducted using R software (R Development Core Team, 2020).

RESULTS AND DISCUSSION

Recognition and extraction of microorganisms associated with basil plants. After seeding and purifying floral structures in culture media, fungi were the predominant microorganisms, and some bacteria were also found. The fungi isolated belonged to the *Aspergillus* genus. Therefore, only two morphotypes of the *Aspergillus* genus were purified, occupying up to 90% of the Petri dishes in the microbiological cultures used. During isolation, only the presence of epiphytic microorganisms in basil flowers was identified. However, the presence of endophytic microorganisms is not ruled out, given the findings of treatments derived from macerated flowers.

The microorganisms in ecosystems establish various relationships, ranging from synergies to antagonisms, as well as physical and biochemical competitions. These interactions are regulated by a series of factors, both biotic and abiotic (Cano, 2011). Microorganisms have a wide range of hosts and are isolated from seeds, flowers, leaves, and stems. Among the most common are endophytes (such as *Pseudomonas* and *Bacillus*), categorized as activators of defense mechanisms in the plant, as well as epiphytes (such as *Alternaria* and *Aspergillus*), which can be pathogenic (Hallmann *et al.* 1997; Rosenblueth & Martínez-Romero, 2006; Acosta *et al.* 2005). This diversity of microorganisms supports the finding of the fungus *Aspergillus* sp.1 and *A.* sp. 2, epiphytic microorganisms obtained from basil flowers. Additionally, the presence of endophytic microorganisms is evident in other aromatic plants; for instance, *Bacillus*

subtilis has been isolated from *Mentha spicata* tissues, demonstrating its role in promoting plant growth and enhancing resistance to pathogens (Castro-Restrepo *et al.* 2022).

The plant material used is related to previous stages of observation and recognition of the structures that *T. angustula* visited most frequently. Bee training showed that the ability to recognize a food source is positive and significant based on the number of visits they made. It is worth noting that foraging times for obtaining rewards vary depending on the resource offered, with the peak search for pollen, oils, and resins occurring in mid-morning (8:00 am – 10:45 am), while at the beginning and end of the afternoon (11:00 am – 5:00 pm), bees prefer nectar, as suggested by Álvarez *et al.* (2014) with *Bombus* sp. and *Thygater analis*, and Torretta *et al.* (2010) with *Melissoptila* sp., *Melisodes* sp., and native bees. Their period of greatest activity is from 8:30 am to 11:45 am (Torretta *et al.* 2010; Carmona-Díaz *et al.* 2017).

Evaluation of Learning. The significant increase in feeder visits across training days (stage 0) ($F(1,8) = 120.91$, $P = 1.14 \times 10^{-5}$) demonstrated bees' capacity for associative learning, as bees progressively improved at recognizing the food stimulus location. The absence of time-of-day effects ($F(1,7) = 3.52$, $P = 0.10$) further confirmed that this learned response was specifically tied to spatial cues rather than temporal patterns. Together, these results (Figure 2) establish that bees successfully formed and retained a location-based association with the food reward through repeated exposure.

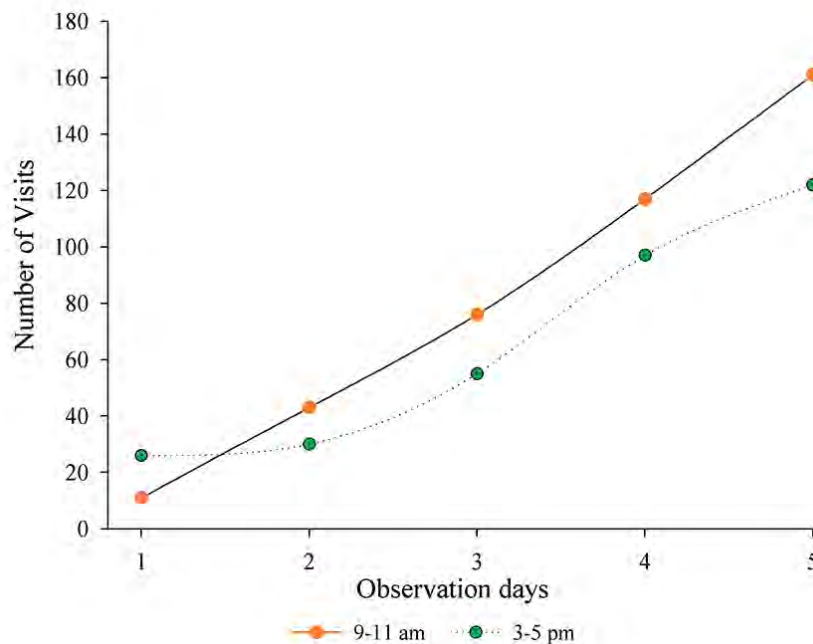


Figure 2. Number of visits of *Tetragonisca angustula* to the training feeders during the five days of observation according to the time of day ($F(1,8) = 120.91$, $P = 1.144 \times 10^{-5}$).

The preference of bees for a resource and the frequency of their visits depend on the nutritional requirements of these insects, as well as the availability, quality, and quantity of resources that a plant offers them (García-García *et al.* 2001, Woodcock *et al.* 2014). *T. angustula* is a generalist bee that visits numerous plant species in search of resources, including botanical families such as Euphorbiaceae, Anacardiaceae, and Rutaceae (Carvalho & Bego, 1995). This bee shows a preference for

flowers that offer a greater quantity of the resource it needs. For example, it has an affinity for basil, selecting flowers in a panicle arrangement, which aligns with the findings of Lopes de Carvalho *et al.* (1999). In addition to basil, other frequent sources of pollen and nectar for *T. angustula* can be *Bulbine frutescens*, *Eucalyptus* spp., and *Leucaena leucocephala*, which share structural and resource similarities with basil (Lopes de Carvalho *et al.* 1999).

Association of nutritional rewards with visual stimuli from basil plants. Throughout the evaluation process, a total of 6604 visits were recorded, with the flower shape influencing bee visits ($F_{(8,126)} = 49.73$; $P < 2.2e^{-16}$) (Figure 3). In this case, the number of visits did not vary by the time of day either ($F_{(2,124)} = 0.55$; $P = 0.57$). Bee responses were influenced by the color of the flower ($F_{(8,126)} = 49.66$; $P < 0.0001$); thus, treatment 7, with a feeder resembling

a panicle and white in color, showed the highest number of visits, followed by treatments 1 and 4, both also resembling a panicle and being purple and green, respectively. These two treatments had the same attraction effect ($F_{(6,124)} = 0.18$, $P = 0.67$). Treatments T2, T6, T8, T9 exhibited the same attraction response ($F_{(3,130)} = 0.96$, $P = 0.33$), and treatments T3 and T5 showed the same effect ($F_{(6,127)} = 0.102$, $P = 0.75$) and the lowest number of visits (Figure 4).

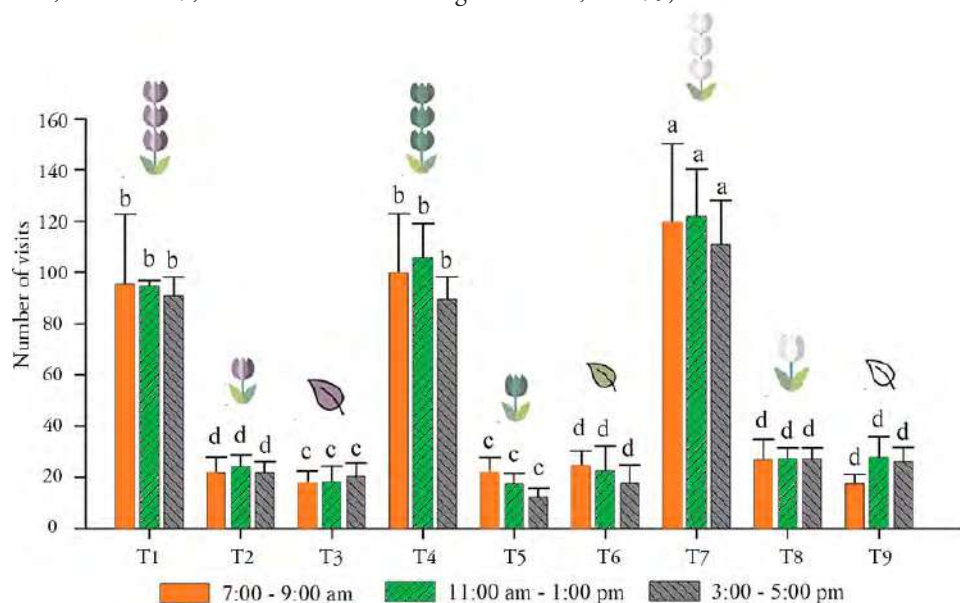


Figure 3. The average number of *Tetragonisca angustula* visiting feeders according to their shape and color.

T1: purple panicle, T2: purple solitary flower, T3: purple single leaf, T4: green panicle, T5: green solitary flower, T6: green single leaf, T7: white panicle, T8: white solitary flower, T9: white single leaf.

Bars with different lowercase letters have significant differences according to the contrast analysis of means within the Generalized Linear Models (GLM) with $\alpha < 0.05$.

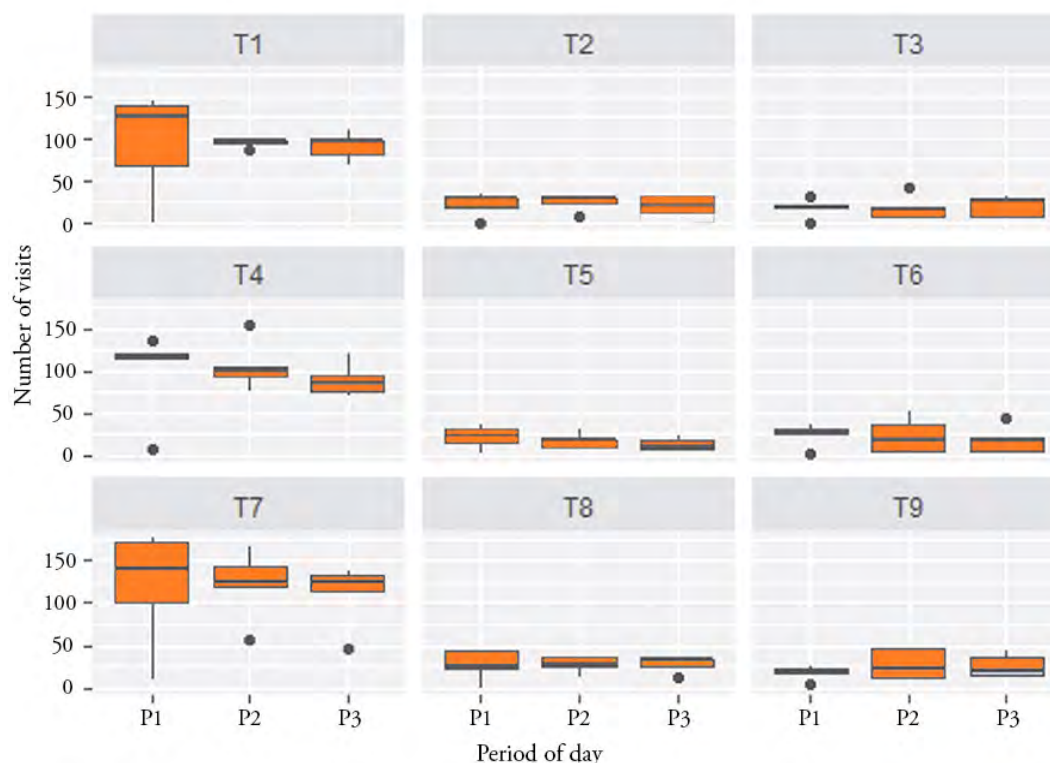


Figure 4. Number of *Tetragonisca angustula* visiting feeders according to treatment and time of day.

T1: Purple panicle, T2: Purple solitary flower, T3: Purple single leaf, T4: Green panicle, T5: Green solitary flower, T6: Green single leaf, T7: White panicle, T8: White solitary flower, T9: White single leaf.

Period of day: P1= 7:00-9:00 am, P2= 11:00-1:00 pm, P3= 3:00-5:00 pm.

According to these results, artificial flowers preferred by bees were multiplied, corresponding to the white color with a panicle shape. In this phase, a total of 3106 visits were recorded, showing a significant preference for the control treatment (supplemented with water + sugar) with a higher number of visits during the periods of 11:00 am – 1:00 pm (P2; figure 5b) and 3:00 – 5:00 pm (P3; figure 5c). In the first period of the day (P1: 7:00 - 9:00 am; figure 5a), more visits were observed in

flowers with essential oil and with sugar solution and microorganism 1 (T3 + T4). According to the observations of the visits, there are significant differences in the early morning hours (P1) and the periods at the beginning and end of the afternoon (P2 and P3) ($F_{(3,131)} = 73.36$, $P = 2.80e^{-16}$), but there is no difference in the number of visits between the latter ($F_{(3,126)} = 1.91$, $P = 0.13$). The response of the insects varies according to the offered food resource ($F_{(8,126)} = 18.49$, $P < 2.2e^{-16}$).

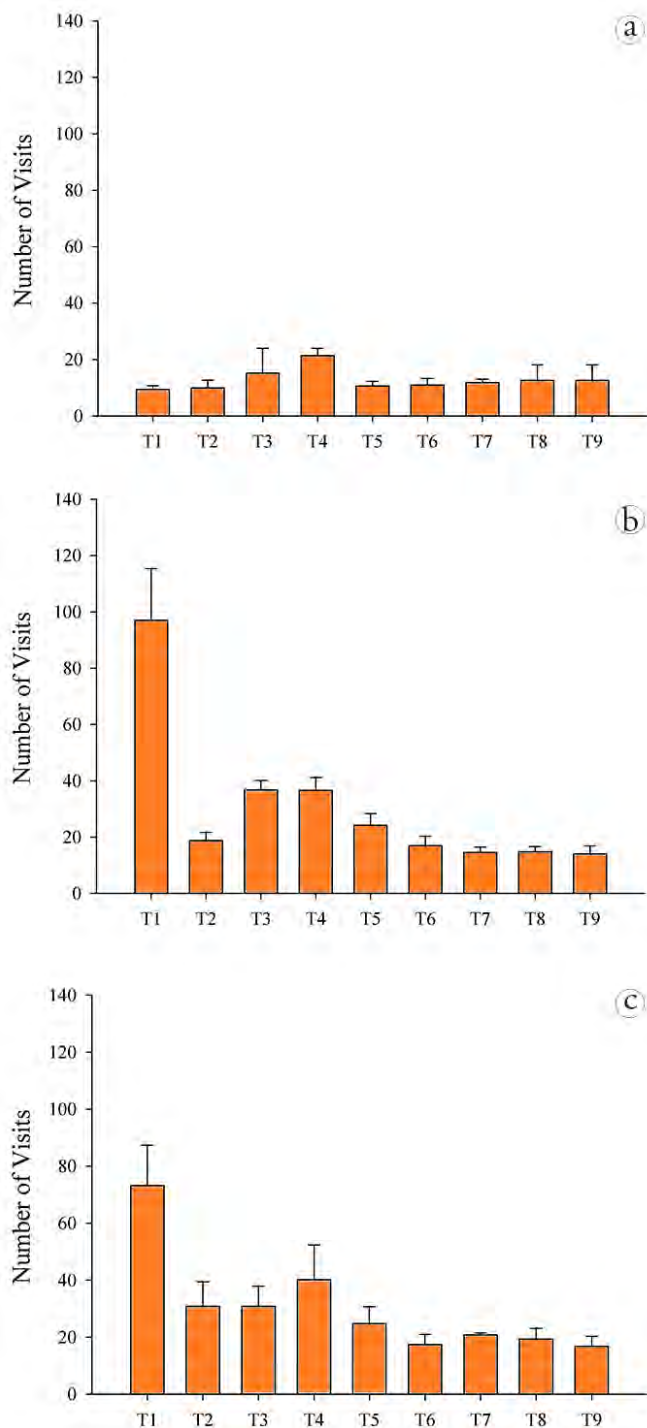


Figure 5. The average number of *Tetragonisca angustula* visiting feeders according to the food resource offered and time of day; a) P1= 7:00-9:00 am; b) P2= 11:00-1:00 pm; c) P3= 3:00-5:00 pm.

T1: flowers with water + sugar solution (1:1), T2: flowers with water + sugar + Microorganism 1 (*Aspergillus* sp.1), T3: flowers with water + sugar (1:1) + Microorganism 2 (*Aspergillus* sp.2), T4: flowers with essential oil, T5: flowers with essential oil + Microorganism 1 (*Aspergillus* sp.1), T6: flowers with essential oil + Microorganism 2 (*Aspergillus* sp.2), T7: flowers with pollen solution, T8: flowers with pollen solution + Microorganism 1 (*Aspergillus* sp.1), T9: flowers with pollen solution + Microorganism 2 (*Aspergillus* sp.2). A significant preference ($p < 0.05$) was observed for times B and C of visits to the supplemented treatment of sugar water, followed by T3, T4 treatments in the three times evaluated.

Bees, in their search for rewards offered by plants, acquire information through their stimuli based on experience related to them, where their visual learning ability represents what is known as adaptive behavioral response (Avarguès-Weber *et al.* 2020). Srinivasan *et al.* (1994) demonstrated that previous visual experience can speed up image processing, allowing bees to categorize visual patterns and distinguish shapes and colors. In addition, they can recognize different sensory stimuli simultaneously with the visual ones. These findings support the positive learning response observed in bees in this study, as well as, their ability to recognize the food source (Srinivasan *et al.* 1998; Giurfa *et al.* 1996).

This genus of fungi plays an essential role in biotechnology and decomposition of organic matter; furthermore, it is recognized as one of the most abundant in nature that can be found in various environments (García-Conde *et al.* 2024). It is also recognized by including important species that maintain beneficial and pathogenic relationships (Dagenais & Keller, 2009; Foley *et al.* 2014). Foley *et al.* (2014) examined beehives to determine the pathogenicity and virulence of common isolates of *Aspergillus*; the results showed that *A. flavus*, *A. nonius*, and *A. phoenicis* were pathogenic to larvae of *Apis mellifera carnica* (Pollman), and adults showed a high susceptibility to infection.

Taking this into account, the attraction of *T. angustula* was evaluated through tests with flowering plants and artificial flowers, along with isolated microorganisms. Diluted solutions of these microorganisms were also tested with other resources (water + sugar, essential oil, pollen, microorganisms alone). The results revealed that during training with artificial flowers (considering both visual stimuli and rewards), bees preferred solutions of sugar water (nectar) + *Aspergillus* 1 and essential oil + *Aspergillus* 2. However, when evaluating only the olfactory response, bees showed no preference for compounds emitted by *Aspergillus* sp. 1. A non-significant response was also observed when the smell of *Aspergillus* sp. 2 was offered as an alternative. However, one arm containing combined volatiles of both microorganisms (*Aspergillus* sp.1 and sp.2) against the opposite arm with flowering basil volatiles, *T. angustula* displayed significantly higher attraction to the microbial volatile mixture than to floral volatiles alone.

Olfactory stimuli evaluation. When evaluating the olfactory response of bees in relation to the plant's phenology, it was evident that: when individuals were given the choice between stimuli from plants without flowers and pure air, 30% of the evaluated individuals responded to the stimulus from plants in the vegetative state (without flowers). When individuals were given the choice between stimuli from flowering plants and pure air, 45% of the evaluated individuals responded to the stimulus from plants in the flowering state. When individuals were given the choice between stimuli from plants in vegetative state and plants with flowers, it was observed that 70% of the evaluated bees preferred the olfactometer arm containing the flowering basil plant (Figure 6a).

Upon evaluating the preference response of *T. angustula* towards basil plants with flowers (plants with higher attraction in phase 1) and the isolated microorganisms, it was observed that when individuals were exposed to the stimulus from *Aspergillus* sp. 1 and

the stimulus from basil plants with flowers, 90% of the evaluated individuals preferred the arm containing the flowering plant. When the stimulus came from flowering plants and *Aspergillus* sp. 2, 65% of the evaluated individuals responded to the stimulus from flowering plants. However, when the stimuli came from flowering plants and the two microorganisms (*Aspergillus* sp. 1; *Aspergillus* sp. 2), 75% of the individuals preferred the stimulus from the two microorganisms (Figure 6b).

Bee visits to a plant are influenced by various stimuli, including olfactory cues. It is known that smells emitted by plants are determined by the production of volatile compounds (Calín-Sánchez *et al.* 2012), which vary according to the plant's structure (stems, leaves, or flowers) (Chalchat & Özcan, 2008; Jiang *et al.* 2016). In the case of basil, it produces essential oils whose chemical composition varies depending on the source structure. Jiang *et al.* (2016) found quantitative and qualitative differences in the compounds emitted by the leaves (β -pinene, Limonene, and Cedrene) and the flowers (β -pinene, α -bergamotene). Additionally, they determined that *O. basilicum* flowers emit compounds at a higher rate than the leaves, including monoterpenoids such as β -pinene and sesquiterpenoids such as α -bergamotene.

The results show that the flowering phase of *O. basilicum* is the most attractive stage to *T. angustula*, considering the choice of plants with flowers over plants without flowers. This suggests that the volatiles emitted by basil plants could help direct *T. angustula* in its preference for reward sources available in different phenological stages. The choice of these bees towards flowering plants is determined by the diversity of semiochemical substances emitted in the floral phase and their concentrations (Matu *et al.* 2021). However, when presented with other olfactory sources, such as pure air, *T. angustula* did not prefer basil plants, as observed in the olfactometer control treatments.

Despite field observations indicating that *T. angustula* visits *O. basilicum* plants, a clear preference for this plant is not evident, as reflected in the results; the effective visits of these bees to basil seem to be conditioned by the interaction of visual and olfactory factors. The latter could be influenced by the presence of other microorganisms in the plant (Vannette, 2020). This is supported by the findings of microbial isolation, revealing the predominant presence of two epiphytic morphotypes of the genus *Aspergillus*, found in both petals and complete flowers of *O. basilicum*.

It's worth mentioning that microorganisms emit various volatile substances (Steiner *et al.* 2007; Davis *et al.* 2012; Dickschat *et al.* 2018). For example, *Aspergillus versicolor* Vuillemin emits sesquiterpenes (Sunesson *et al.* 1995; Steiner *et al.* 2007; Dickschat *et al.* 2018). These emissions play a crucial role in the behavior of some insects. Davis *et al.* (2012) studied the volatile emissions of epiphytic fungi on apples as semiochemical attractants for eusocial wasps, demonstrating that volatiles emitted by the epiphytic fungus *Aureobasidium pullulans* can influence the attraction of these wasps, specifically *Vespula pensylvanica* and *V. germanica*, which are oriented towards these crops.

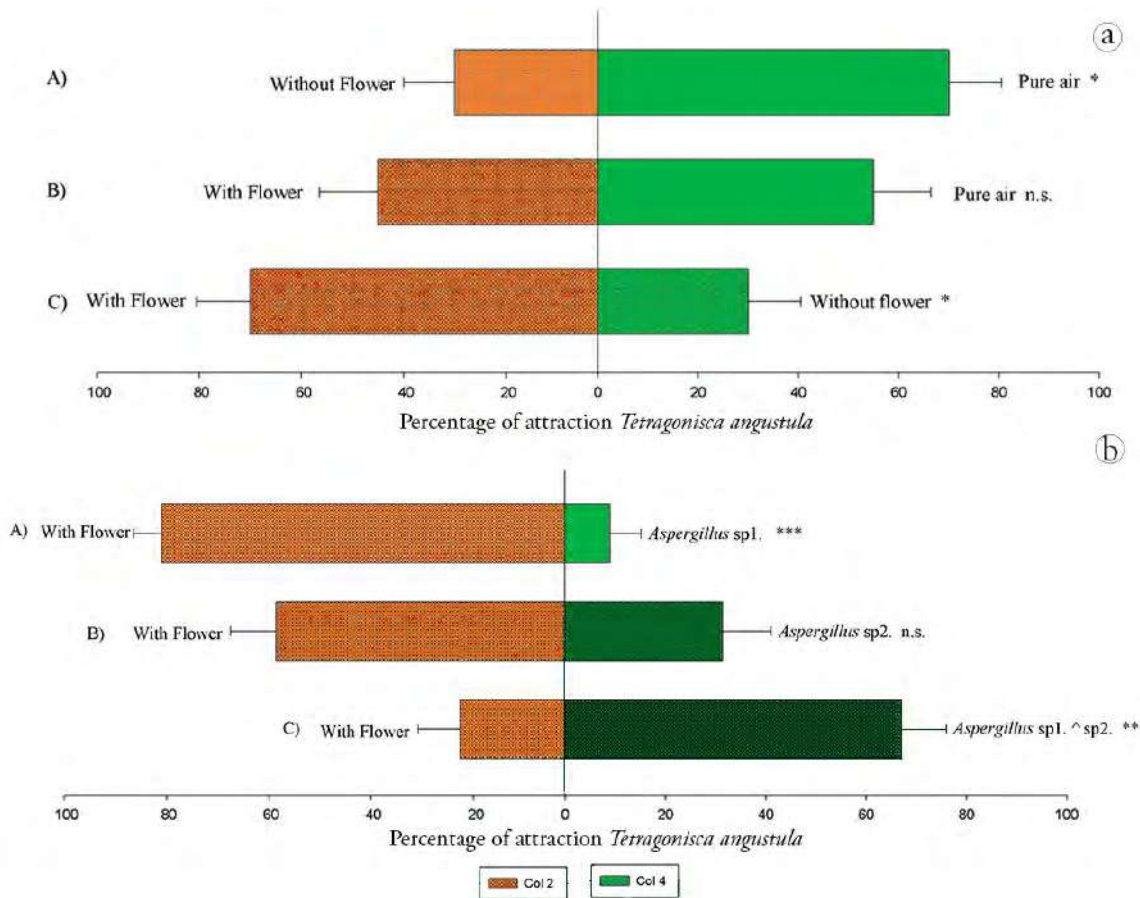


Figure 6. a) Percentages of net attraction ($\pm$ SE) of *T. angustula* to basil plants. A) plants without flowers/pure air $\chi^2(1,38) = 48.869$; $P = 0.0103$; B) flowering plants/pure air $\chi^2(1,38) = 55.051$; $P = 0.5267$; C) flowering plants/non-flowering plants $\chi^2(1,38) = 48.869$; $P = 0.0103$. b) Percentages of net attraction ($\pm$ SE) of *T. angustula* to volatiles emitted by isolated microorganisms. A) flowering plants/*Aspergillus* sp.1, $\chi^2(1,38) = 26.007$; $P = 5.752e-08$; B) flowering plants/*Aspergillus* sp.2, $\chi^2(1,38) = 51.796$; $P = 0.05587$; C) flowering plants/*Aspergillus* (sp.1 and sp.2) $\chi^2(1,38) = 44.987$; $P = 0.001217$.

*Indicates significant differences ($P < 0.05$) in comparisons.

Therefore, it is suggested that *T. angustula* bees may be guided by obtaining a resource along with volatiles emitted by these *Aspergillus* microorganisms, and that the variation in the volatile profile of each morphotype may be crucial for responses, whether attraction or non-preference. This considers that microorganisms produce multiple volatile organic compounds, and insects are oriented towards a mixture of compounds representative of fungal volatiles, which vary in their chemical composition, with some being more attractive than others (Steiner *et al.* 2007; Davis *et al.* 2012).

The results demonstrate that the smell of flowers and microorganisms associated with *O. basilicum* is essential for the interaction with *T. angustula*. Epiphytic microbiota emits compounds that characterize the smell of leaves, flowers, and fruits (Peñuelas *et al.* 2014; Sangiorgio *et al.* 2022), and the quantity of flowers combined with the offered resource and microbial volatiles in attracting pollinators is an essential factor to consider. Many of the smells that guide these insects are produced by epiphytic microorganisms; therefore, it is necessary to analyze these interaction dynamics that are useful in the management of cultivated plants, considering that modifications in the profile of emitted compounds can interfere with the behavior of these insects.

Conflict of interest: statement “The authors declare no conflict of interest” **Funding:** FONCIENCIAS 2017 for providing funds in the macro project VIN2017125 “Evaluation of the bee-aromatic plant productive system with a model of the angelita bee *Tetragnisca angustula* (Hymenoptera: Apidae) and the cultivation of basil *Ocimum basilicum* (Lamiaceae)”, Universidad del Magdalena. **Author’s contribution:** Julitza M. Fuentes-Polo (Conceptualization, Data curation, Formal analysis, Investigation, Project administration, Resources, supervision, validation, visualization, Writing – original draft, Writing – review & editing, Samuel D. Toncel-Pérez (Conceptualization, Investigation, Project administration, Resources, validation. Nataly de-la-Pava-Suarez (Funding acquisition, Formal analysis, Investigation, Methodology, Project administration, Resources, supervision, Software, validation, visualization, Writing – original draft, Writing – review & editing.

REFERENCES

- ACOSTA, M.; ALVARADO, Y.; CRUZ, M.; LEIVA, M.; DELGADO, L. 2005. Micobiota epífita y contaminantes fungosos del establecimiento in vitro de *Eucalyptus grandis*. Manejo Integrado de Plagas y Agroecología. 75:60-63.

- AGRIOS, G.N. 2005. Plant pathology. Fifth edition. Elsevier Academic Press. EE. UU. 922p.
- AIZEN, M.A.; VÁZQUEZ, D.P.; SMITH-RAMÍREZ, C. 2002. Historia natural y conservación de los mutualismos planta-animal del bosque templado de Sudamérica austral. *Revista chilena de historia natural*. 75(1):79-97. <http://dx.doi.org/10.4067/S0716-078X2002000100008>
- ÁLVAREZ, L.J.; LUCIA, M.; RAMELLO, P.J.; PINO, M.D.; ABRAHAMOVICH, A.H. 2014. Abejas asociadas a cultivos de berenjena (*Solanum melongena* L., Solanaceae) en invernadero del Cinturón Hortícola de La Plata, Buenos Aires, Argentina. *Revista de la Facultad de Agronomía*. 113(2):211-217.
- ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE ENTOMOLOGÍA; JARDÍN BOTÁNICO ATLÁNTICO; CENTRO IBEROAMERICANO DE LA BIODIVERSIDAD. 2002. Polinizadores y biodiversidad. Apolo Observatorio de Agentes Polinizadores. España. 160p. Available from Internet in: https://apolo.entomologica.es/cont/materiales/informe_tecnico.pdf
- AVARGUÈS-WEBER, FINKE, V.; NAGY, M.; SZABÓ, T.; D'AMARO, D.; DYER, A.G.; FISER, J. 2020. Different mechanisms underlie implicit visual statistical learning in honey bees and humans. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 117(41):25923-25934. <https://doi.org/10.1073/pnas.1919387117>
- CALÍN-SÁNCHEZ, Á.; LECH, K.; SZUMNY, A.; FIGIEL, A.; CARBONELL-BARRACHINA, Á.A. 2012. Volatile composition of sweet basil essential oil (*Ocimum basilicum* L.) as affected by drying method. *Food Research International*. 48(1):217-225. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2012.03.015>
- CAÑEDO, T.; AMES, T. 2004. Manual de laboratorio para el manejo de hongos entomopatógenos. International Potato Center. 62p.
- CANO, M.A. 2011. Interacción de microorganismos benéficos en plantas: micorrizas, *Trichoderma* spp. y *Pseudomonas* spp. Una revisión. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*. 14(2):15-31. <https://doi.org/10.31910/rudca.v14.n2.2011.771>
- CARMONA-DÍAZ, G.; GARCÍA-FRANCO, J.G.; HERNÁNDEZ CARMONA, S.; RETURETA APONTE, A.; QUINTANA MORALES, P.C.; LÓPEZ GALINDO, A.; GARCÍA ORDUÑA, F. 2017. Forrajeo y polinización del arbusto *Malpighia glabra* (Malpighiaceae) y la orquídea *Oncidium cosymbephorum* (Orchidaceae) por abejas *Centris* (Apidae) en la isla Agaltepec, Veracruz, México. *eNeurobiología*. 8(19):181217.
- CARVALHO, A.M.; BEGO, L.R. 1995. Seasonality of dominant species of bees in the Panga Ecological Reserve, Cerrado, Uberlândia, MG. *Anais da Sociedade Entomológica do Brasil*. 24(2):329-337. <https://doi.org/10.37486/0301-8059.v24i2.1034>
- CASTRO-RESTREPO, D.; DOMINGUEZ, M.I.; GAVIRIA-GUTIÉRREZ, B.; OSORIO, E.; SIERRA, K. 2022. Biotization of endophytes *Trichoderma asperellum* and *Bacillus subtilis* in *Mentha spicata* microplants to promote growth, pathogen tolerance and specialized plant metabolites. *Plants*. 11(11):1474. <https://doi.org/10.3390/plants11111474>
- CHALCHAT, J.C.; ÖZCAN, M.M. 2008. Comparative essential oil composition of flowers, leaves and stems of basil (*Ocimum basilicum* L.) used as herb. *Food Chemistry*. 110(2):501-503. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.02.018>
- CLARKE, S.C. 2018. Collins and Lyne's Microbiological Methods. *British Journal of Biomedical Science*. 61(2):113. <https://doi.org/10.1080/09674845.2004.11978056>
- CRAWLEY, M.J. 2012. The R book. John Wiley & Sons. 1051p. <https://doi.org/10.1002/9781118448908>
- DAGENAIS, T.R.; KELLER, N.P. 2009. Pathogenesis of *Aspergillus fumigatus* in invasive aspergillosis. *Clinical Microbiology Reviews*. 22(3):447-465. <https://doi.org/10.1128/CMR.00055-08>
- DAVIS, T.S.; BOUNDY-MILLS, K.; LANDOLT, P.J. 2012. Volatile emissions from an epiphytic fungus are semiochemicals for eusocial wasps. *Microbial Ecology*. 64(4):1056-1063. <https://doi.org/10.1007/s00248-012-0074-2>
- DE BRUYNE, M.; BAKER, T.C. 2008. Odor detection in insects: volatile codes. *Journal of Chemical Ecology*. 34(7):882-897. <https://doi.org/10.1007/s10886-008-9485-4>
- DICKSCHAT, J.S.; CELIK, E.; BROCK, N.L. 2018. Volatiles from three genome sequenced fungi from the genus *Aspergillus*. *Beilstein Journal of Organic Chemistry*. 14(1):900-910. <https://doi.org/10.3762/bjoc.14.77>
- FOLEY, K.; FAZIO, G.; JENSEN, A.B.; HUGHES, W.O. 2014. The distribution of *Aspergillus* spp. opportunistic parasites in hives and their pathogenicity to honeybees. *Veterinary Microbiology*. 169(3-4):203-210. <https://doi.org/10.1016/j.vetmic.2013.11.029>
- GARCÍA-CONDE, K.B.; CERNA-CHÁVEZ, E.; OCHOA-FUENTES, Y.M.; VELÁZQUEZ-GUERRERO, J.J. 2024. *Aspergillus oryzae*: Una oportunidad para la agricultura. *Revista mexicana de fitopatología*. 42(1). <https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.2302-2>

- GARCÍA-GARCÍA, M.C.; ORTIZ, P.L.; DÍEZ DAPENA, M.J. 2001. Pollen collecting behaviour of *Apis mellifera* during one day. Grana. 40(4-5):205-209. <https://doi.org/10.1080/001731301317223141>
- GERMAINE, K.; KEOGH, E.; GARCIA-CABELLOS, G.; BORREMANS, B.; LELIE, D.; BARAC, T.; OEYEN, L.; VANGRONVELD, J.; MOORE, F.P.; MOORE, E.R.B.; CAMPBELL, C.D.; RYAN, D.; DOWLING, D.N. 2004. Colonisation of poplar trees by gfp expressing bacterial endophytes. FEMS Microbiology Ecology. 48(1):109-118. <https://doi.org/10.1016/j.femsec.2003.12.009>
- GIURFA, M. 2013. Cognition with few neurons: higher-order learning in insects. Trends in Neurosciences. 36(5):285-294. <https://doi.org/10.1016/j.tins.2012.12.011>
- GIURFA, M.; EICHMANN, B.; MENZEL, R. 1996. Symmetry perception in an insect. Nature. 382(6590):458-461. <https://doi.org/10.1038/382458a0>
- GONZÁLEZ-ZÚÑIGA, J.A.; GONZÁLEZ-SÁNCHEZ, H.M.; GONZÁLEZ-PALOMARES, S.; ROSALES-REYES, T.; ANDRADE-GONZÁLEZ, I. 2011. Microextracción en fase sólida de compuestos volátiles en albahaca (*Ocimum basilicum* L.). Acta Universitaria. 21(1):17-22. <https://doi.org/10.15174/au.2011.48>
- GRANADOS-SÁNCHEZ, D.; LÓPEZ-RÍOS, G.F.; HERNÁNDEZ-GARCÍA, M.Á.; SÁNCHEZ-GONZÁLEZ, A. 2003. Ecología de las plantas epífitas. Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente. 9(2):101-111.
- HALLMANN, J.; QUADT-HALLMANN, A.; MAHAFFEE, W.F.; KLOPPER, J.W. 1997. Bacterial endophytes in agricultural crops. Canadian Journal of Microbiology. 43(10):895-914. <https://doi.org/10.1139/m97-131>
- HEMPEL DE IBARRA, N.; HOLTZE, S.; BÄUCKER, C.; SPRAU, P.; VOROBYEV, M. 2022. The role of colour patterns for the recognition of flowers by bees. Philosophical Transactions of the Royal Society. 377(1862):20210284. <http://doi.org/10.1098/rstb.2021.0284>
- HÜE, T.; CAUQUIL, L.; FOKOU, J.H.; DONGMO, P.J.; BAKARNGA-VIA, I.; MENUT, C. 2015. Acaricidal activity of five essential oils of *Ocimum* species on *Rhipicephalus (Boophilus) microplus* larvae. Parasitology Research. <https://doi.org/10.1007/s00436-014-4164-6>
- HUNG, K.L.J.; KINGSTON, J.M.; ALBRECHT, M.; HOLWAY, D.A.; KOHN, J.R. 2018. The worldwide importance of honeybees as pollinators in natural habitats. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences. 285(1870):20172140. <http://doi.org/10.1098/rspb.2017.2140>
- JIANG, Y.; YE, J.; LI, S.; NIINEMETS, Ü. 2016. Regulation of floral terpenoid emission and biosynthesis in sweet basil (*Ocimum basilicum*). Journal of Plant Growth Regulation. 35:921-935. <https://doi.org/10.1007/s00344-016-9591-4>
- KLEIN, A.M.; VAISSIERE, B.E.; CANE, J.H.; STEFFAN-DEWENTER, I.; CUNNINGHAM, S.A.; KREMEN, C.; TSCHARNTKE, T. 2007. Importance of pollinators in changing landscapes for world crops. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences. 274(1608):303-313. <https://doi.org/10.1098/rspb.2006.3721>
- KONEMAN, A.; DOWELL, S. 1989. Diagnóstico microbiológico. Texto y atlas color. 2ª ed. Ed. Panamericana (México).
- LOPES DE CARVALHO, C.A.; MARCHINI, L.C. 1999. Tipos polínicos coletados por *Nannotrigona testaceicornis* e *Tetragonisca angustula* (Hymenoptera, Apidae, Meliponinae). Scientia Agricola. 56:717-722. <https://doi.org/10.1590/S0103-90161999000300029>
- LÓPEZ-ÁVILA, A.; RINCÓN, D.F. 2006. Diseño de un olfatómetro de flujo de aire para medir respuestas olfativas de insectos de tamaño mediano y pequeño. Ciencia y Tecnología Agropecuaria. 7(1):61-65. https://doi.org/10.21930/rcta.vol7_num1_art:61
- MATU, F.K.; MURUNGI, L.K.; MOHAMED, S.; DELETRE, E. 2021. Behavioral response of the greenhouse whitefly (*Trialeurodes vaporariorum*) to plant volatiles of *Ocimum basilicum* and *Tagetes minuta*. Chemoecology. 31(1):47-62. <https://doi.org/10.1007/s00049-020-00327-z>
- MENZEL, R. 2001. Behavioral and neural mechanisms of learning and memory as determinants of flower constancy. In: Chittka, L.; Thomson, J.D. (eds). Cognitive ecology of pollination. Ed. Cambridge University Press. p.21-40. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511542268.003>
- MICHENER, C.D. 2007. The bees of the world. second edition. Johns Hopkins University Press. EE.UU. 992p.
- MORÉ, E.; FANLO, M.; MELERO, R.; CRISTÓBAL, R. 2010. Guía para la producción sostenible de plantas aromáticas y medicinales. Centre Tecnològic Forestal de Catalunya. 265p. Available from Internet in: <https://apsb.ctfc.cat/docs/GUIA%20PAM-CASTELLAFinal.pdf>
- MURILLO PEREA, E.; VIÑA PATIÑO, A. 1999. Determinación de los constituyentes volátiles de la albahaca (*Ocimum* spp.) mediante dos métodos de extracción. Revista Colombiana de Química. 28(1):65-74.
- MURILLO, E.; FERNÁNDEZ, K.; SIERRA, D.; VIÑA, A. 2004. Caracterización fisicoquímica del aceite esencial de albahaca. II. Revista Colombiana de Química. 33(2):139-148.

- OCAÑA-CABRERA, J.S.; LIRIA, J.; VIZUETE, K.; CHOLOTA-IZA, C.; ESPINOZA-ZURITA, F.; SAEGERMAN, C.; MARTIN-SOLANO, S.; RON-ROMÁN, J. 2022. Pollen preferences of stingless bees in the Amazon region and southern highlands of Ecuador by scanning electron microscopy and morphometry. *PLOS One*. 17(9):e0272580. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0272580>
- OLLERTON, J. 2021. Pollinators and pollination: nature and society. Pelagic Publishing Ltd. Reino Unido. 336p.
- PARRA, G.N. 2001. Guía para la cría y manejo de la abeja Angelita o Virginita *Tetragonisca angustula* Illiger. Serie Ciencia y tecnología. No. 84. Convenio Andrés Bello. Colombia. 43p.
- PEÑUELAS, J.; FARRÉ-ARMENGOL, G.; LLUSIA, J.; GARGALLO-GARRIGA, A.; RICO, L.; SARDANS, J.; TERRADAS, J.; FILELLA, I. 2014. Removal of floral microbiota reduces floral terpene emissions. *Scientific Reports*. 4(1):6727. <https://doi.org/10.1038/srep06727>
- PHOTITA, W.; LUMYONG, S.; LUMYONG, P.; MCKENZIE, E.H.C.; HYDE, K.D. 2004. Are some endophytes of *Musa acuminata* latent pathogens? *Fungal Diversity*. 16:131-140.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM. 2020. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing (Austria). Available from Internet in: <https://www.R-project.org/>
- ROSENBLUETH, M.; MARTÍNEZ-ROMERO, E. 2006. Endófitos bacterianos y sus interacciones con los huéspedes. *Interacciones moleculares planta-microbio*. 19(8):827-837. <https://doi.org/10.1094/MPMI-19-0827>
- SANGIORGIO, D.; CELLINI, A.; SPINELLI, F.; PASTORE, C.; FARNETI, B.; SAVIOLI, S.; RODRIGUEZ-ESTRADA, M.T.; DONATI, I. 2022. Contribution of fruit microbiome to raspberry volatile organic compounds emission. *Postharvest Biology and Technology* (Países Bajos). 183:111742. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2021.111742>
- SILVA LIMA, A.; MILHOMEM, M.N.; SANTOS MONTEIRO, O.; PEREIRA ARRUDA, A.C.; MARTINS DE CASTRO, J.A.; LOPES FERNANDES, Y.M.; SOARES MAIA, J.G.; COSTA-JUNIOR, L.M. 2018. Seasonal analysis and acaricidal activity of the thymol-type essential oil of *Ocimum gratissimum* and its major constituents against *Rhipicephalus microplus* (Acari: Ixodidae). *Parasitology Research*. 117:59-65. <https://doi.org/10.1007/s00436-017-5662-0>
- SLAA, E.J.; SÁNCHEZ CHAVES, L.A.; MALAGODI-BRAGA, K.S.; HOFSTEDE, F.E. 2006. Stingless bees in applied pollination: Practice and perspectives. *EDP Sciences Apidologie*. 37(2):293-315. <https://doi.org/10.1051/apido:2006022>
- SRINIVASAN, M.V.; ZHANG, S.W.; WITNEY, K. 1994. Visual discrimination of pattern orientation by honeybees: performance and implications for 'cortical' processing. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*. 343(1304):199-210. <https://doi.org/10.1098/rstb.1994.0021>
- SRINIVASAN, M.V.; ZHANG, S.W.; ZHU, H. 1998. Honeybees link sights to smells. *Nature*. 396(6712):637-638. <https://doi.org/10.1038/25272>
- STEINER, S.; ERDMANN, D.; STEIDLE, J.L.; RUTHER, J. 2007. Host habitat assessment by a parasitoid using fungal volatiles. *Frontiers in Zoology*. 4:3. <https://doi.org/10.1186/1742-9994-4-3>
- STONE, J.K.; POLISHOOK, J.D.; WHITE, J.F. 2004. Endophytic fungi. In: Mueller, G. M.; Bills, G. F.; Foster, M. S. (eds). *Biodiversity of fungi: inventory and monitoring methods*. Elsevier Academic Press. EEUU. p.241-270.
- SUNESSON, A.L.; VAES, W.; NILSSON, C.; BLOMQUIST, G.; ANDERSSON, B.; CARLSON, R. 1995. Identification of volatile metabolites from five fungal species cultivated on two media. *Applied and Environmental Microbiology*. 61(8):2911-2918. <https://doi.org/10.1128/aem.61.8.2911-2918.1995>
- TORRETTA, J.P.; MEDAN, D.; ROIG ALSINA, A.; MONTALDO, N.H. 2010. Visitantes florales diurnos del girasol (*Helianthus annuus*, Asterales: Asteraceae) en la Argentina. *Revista de la Sociedad Entomológica Argentina*. 69(1-2):17-32.
- TSAVKELOVA, E.A.; CHERDYNTSEVA, T.A.; BOTINA, S.G.; NETRUSOV, A.I. 2007. Bacteria associated with orchid roots and microbial production of auxin. *Microbiological Research*. 162(1):69-76. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2006.07.014>
- VANNETTE, R.L. 2020. The floral microbiome: plant, pollinator, and microbial perspectives. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*. 51(1):363-386. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-011720-013401>
- VÉLEZ, P.E.; POSADA, F.J.; MARÍN, P.; GONZALEZ, M.T.; OSORIO, E.; BUSTILLO, A.E. 1997. Técnicas para el control de calidad de formulaciones de hongos entomopatógenos. *Cenicafé*. 24p.
- WOODCOCK, T.S.; LARSON, B.M.H.; KEVAN, P.G.; INOUE, D.W.; LUNAU, K. 2014. Flies and flowers II: floral attractants and rewards. *Journal of Pollination Ecology*. 12:63-94. [https://doi.org/10.26786/1920-7603\(2014\)5](https://doi.org/10.26786/1920-7603(2014)5)



Actividad antrópica, calidad del suelo y estado de conservación de relictos de bosque seco tropical en Enciso Santander, Colombia

Anthropic activity, soil quality and conservation status of tropical dry forest relicts in Enciso Santander, Colombia

Belcy Viviana Gómez-Pacheco¹ ; Cristian Guerrero-Valderrama¹ ; Doris Duarte-Hernández² ;
Ricardo Andrés Oviedo-Celis^{2*}

¹Universidad Industrial de Santander; Málaga - Santander, Colombia; e-mail: belcyviviana01@gmail.com; valderramaguerrero@gmail.com

²Universidad Industrial de Santander; Programa Ingeniería Forestal, Instituto de Proyección Regional y Educación a Distancia IPRED. Málaga - Santander, Colombia; e-mail: dduarte@correo.uis.edu.co; raovicel@correo.uis.edu.co

*autor de correspondencia raovicel@correo.uis.edu.co

Cómo citar: Gómez-Pacheco, B.V.; Guerrero-Valderrama, C.; Duarte-Hernández, D.; Oviedo-Celis, R.A. 2025. Actividad antrópica, calidad del suelo y estado de conservación de relictos de bosque seco tropical en Enciso Santander, Colombia. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 28(1):e2378. <http://doi.org/10.31910/rudca.v28.n1.2025.2378>

Artículo de acceso abierto publicado por Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, bajo una Licencia Creative Commons CC BY-NC 4.0

Publicación oficial de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Institución de Educación Superior Acreditada en Alta Calidad por el Ministerio de Educación Nacional

Recibido: marzo 13 de 2023

Aceptado: junio 9 de 2025

Editado por: Helber Adrián Arévalo Maldonado

RESUMEN

El bosque seco tropical y el suelo que lo soporta son recursos naturales estratégicos para la vida; no obstante, el desarrollo histórico de actividades productivas ha afectado este ecosistema forestal, lo que compromete el aporte de servicios ecosistémicos. Esta situación amerita una reflexión integral para comprender y mitigar esta problemática. El presente trabajo tuvo como objeto analizar la influencia antrópica en la calidad del suelo y conservación del bosque seco en Enciso - Santander, Colombia. Se caracterizó un grupo de propietarios campesinos en aspectos socioeconómicos y ambientales, fincas donde se establecieron unidades de muestreo para el bosque seco y fueron colectadas muestras de suelo, a una profundidad de 0 - 30 cm en bosque y áreas productivas, para analizar propiedades físicas, químicas y biológicas. Los datos fueron procesados mediante estadística descriptiva e inferencial, que revelaron relaciones entre el suelo, el bosque y las comunidades. Los resultados indicaron que las comunidades campesinas no tienen un nivel óptimo de calidad de vida y existe una correlación directa de uso del suelo y del bosque, influenciada por la cultura y tradición ancestral. Algunas propiedades físicas y químicas definieron la alta calidad del suelo forestal. Se observó una relación directa entre la estructura, la población y los problemas socioambientales, que confirmaron la influencia de la actividad antrópica sobre la calidad del suelo y el bosque seco. La información aportada es referente para la gestión edáfica y forestal en zonas secas del trópico, a nivel nacional.

Palabras claves: Comunidades rurales; Degradación ambiental; Gestión forestal; Manejo agrícola; Suelo forestal.

ABSTRACT

The tropical dry forest and the soil that supports it are strategic natural resources for life. However, the historical development of productive activities has affected this forest ecosystem, compromising the provision of ecosystem services. This situation warrants a comprehensive reflection on understanding and mitigating this problem. The present work aimed to analyze the anthropogenic influence on soil quality and conservation of the dry forest in Enciso, Santander, Colombia. A group of peasant landowners was characterized in socioeconomic and environmental aspects, farms where sampling units were established for the dry forest, and soil samples were collected at 0 - 30 cm depth in forest and productive areas to analyze physical, chemical, and biological properties. Data were processed using descriptive and inferential statistics that revealed relationships between soil, forest, and communities. The results indicate that rural communities do not have an optimal quality of life, and there is a direct correlation between land and forest use, influenced by culture and ancestral tradition. Some physical and chemical properties defined the high quality of the forest soil. A direct relationship was observed between structure, population, and socio-environmental problems, confirming human activity's influence on soil quality and the dry forest. The information provided is a reference for soil and forest management in dry tropical areas nationwide.

Keywords: Agricultural management; Environmental degradation; Forest land; Forest management; Rural communities.

INTRODUCCIÓN

El Bosque Seco Tropical (BST) es un ecosistema presente en regiones con estacionalidad hídrica marcada y elevada temperatura, condiciones que generan una evapotranspiración mayor a la precipitación (Suárez-R. & Vargas-R., 2019). El BST alberga gran biodiversidad, la mayoría endémica y adaptada para sobrevivir en condiciones de oferta ambiental extrema, como altas temperaturas y déficit hídrico (Banda-R. *et al.* 2015; Berdugo-Lattke, & Rangel-Ch, 2015; Pardo & Moreno, 2018). Según Miles *et al.* (2006), el 54,2 % del área de este ecosistema se concentra en Suramérica, conformada por fragmentos, en su mayoría, en condiciones críticas de conservación (FAO, 2020), a causa de la agricultura y ganadería, los cuales, son reconocidos como motores de la transformación, degradación y pérdida, no solo del ecosistema sino del suelo que lo soporta (Alvarado-Solano & Otero Ospina, 2015).

En Colombia, las actividades productivas agropecuarias han reducido la extensión del BST al 8 % del ecosistema original (García & González, 2019), situación que compromete la sostenibilidad de este patrimonio forestal y de los territorios donde el ecosistema se presenta como cobertura natural. El uso y manejo del suelo crea una relación directa entre comunidades rurales y las actividades productivas desarrolladas a diferente escala espacial y temporal; sin embargo, la conversión del BST a manejos diferentes al forestal, promueve la reducción de capacidad productiva del suelo y del potencial de rentabilidad para los agricultores en el tiempo (Mesa-Sierra *et al.* 2022).

Al respecto, Kyok *et al.* (2006) mencionan que las actividades antrópicas impactan no solo la cobertura vegetal y el suelo, también alteran otros componentes biofísicos del ecosistema, situación que reduce el aporte

de bienes y servicios ecosistémicos, incrementan las emisiones de gases de efecto invernadero, transforma el paisaje rural, aumenta la pobreza humana y altera el clima, aspectos con implicaciones ambientales y sociales, que comprometen la sostenibilidad y calidad de vida en estos territorios.

En la región Nororiental de Colombia, específicamente el departamento de Santander y el municipio de Enciso, el BST corresponde a relictos en un paisaje con alto grado de fragmentación, resultado de la implementación de manejos agropecuarios, por las comunidades que allí habitan. La información de la influencia que tienen las comunidades campesinas y las actividades productivas que realizan sobre el estado de conservación del BST y la calidad del suelo en esta región del país, es escasa.

Esta investigación analiza la relación sociedad-bosque-suelo, mediante la caracterización de unidades de producción familiar rural, para luego establecer las condiciones actuales de calidad del suelo y estado de conservación de relictos de bosque seco tropical. Este abordaje busca comprender de forma integral el vínculo de uso de estos recursos naturales en el contexto espacial de estudio. Los resultados generados aportan información base, para definir acciones de gestión forestal y edáfica en esta región del país, que fortalezcan la gobernanza local.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio. La vereda Juncal municipio de Enciso Santander, se localiza a 6°36'16" N, 72°42'30" W, a 1215 m s.n.m., con una precipitación promedio anual de 1.300 mm y temperatura media 25 °C (Figura 1). Los suelos, se clasifican como inceptisoles con pendientes entre el 30 a 50 %, característicos de la cuenca media del río Servitá.

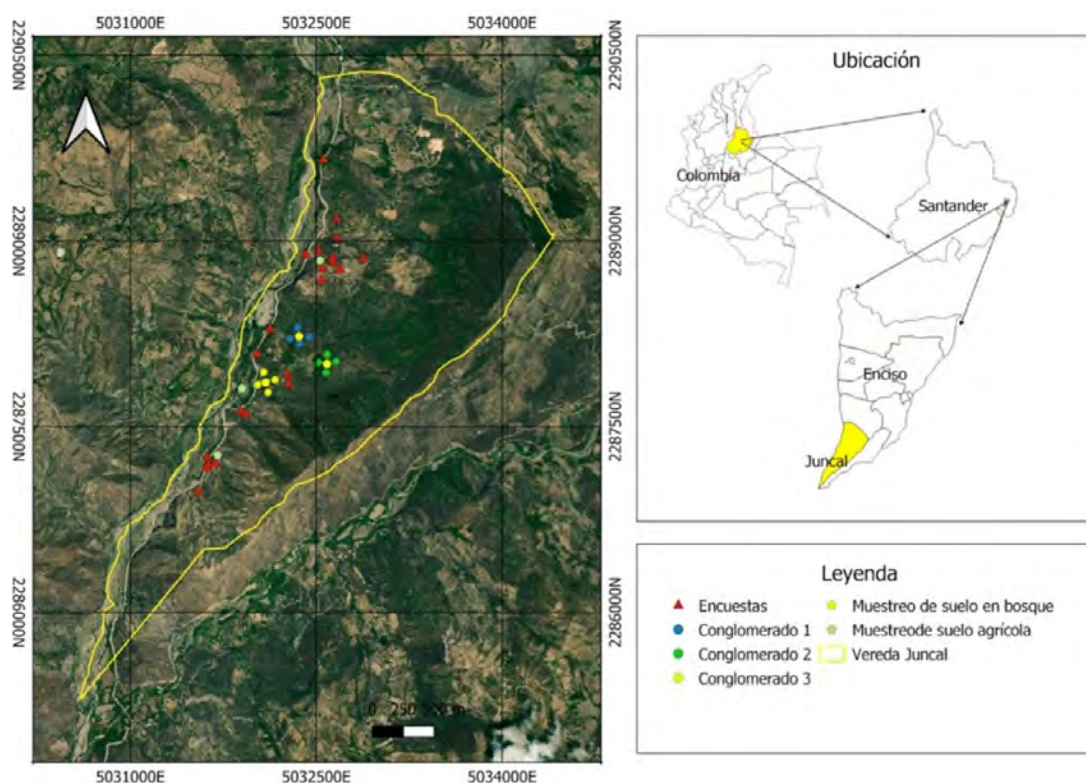


Figura 1. Área de estudio, ubicación puntos muestreo de suelo, conglomerados BST y encuestas comunidad. Vereda Juncal Enciso - Santander, Colombia.

Caracterización social. Fueron seleccionadas al azar 24 de 36 familias que habitan la vereda Juncal, donde se aplicó un instrumento de campo tipo encuesta, estructurado en aspectos sociales, ambientales, económicos y técnicos. Para la caracterización de las Unidades de Producción Familiar Rural (UPFR), se adaptó la propuesta de indicadores de Oviedo-Celis & Castro-Escobar (2021).

Muestreo de suelo. Fueron colectadas seis muestras compuestas de suelo a una profundidad de 0-30 cm extraídas con barreno, tres en manejos agrícolas, donde se implementaron cultivos transitorios de tomate, melón, plátano y yuca y tres en manejos forestales del BST, clasificados según la presencia de tensionantes, así: T1 presencia de caprinos, T2 baja intervención y caminos, y T3 presencia de vía secundaria rural.

Las muestras fueron analizadas para determinar propiedades químicas, como el potencial de hidrógeno (pH), por el método electrométrico relación 1:1 agua destilada; para el carbono orgánico (CO %) se empleó el método colorimétrico: Walkley Black $K_2Cr_2O_7-H_2SO_4$; el fósforo disponible (P), por el método colorimétrico: Bray II. HCl 0,1 N-NH₄F 0,03 N; el calcio (Ca), magnesio (Mg), sodio (Na) y potasio (K), por absorción atómica; la capacidad de intercambio catiónico (CIC), por extracción: acetato de amonio y la conductividad eléctrica, mediante método electrométrico: agua destilada.

En el caso de las propiedades físicas, la textura se determinó por el método de Bouyoucos tamiz de 2 mm; para la densidad aparente (Da), se empleó el método de cilindro con volumen conocido; la densidad real (Dr), por el método de picnómetro; la humedad gravimétrica (HG), mediante secado en horno a 105 °C, por 8 horas; la humedad volumétrica (HV) como la relación de volumen de agua y suelo conocidos y la porosidad total (Pt), como la relación entre Da y Dr.

Las propiedades biológicas solo se tuvieron en cuenta el número de individuos, determinado por conteo directo en campo, para cada punto de muestreo.

Índice de calidad del suelo. El índice de calidad de suelo aditivo (ICSA) se determinó según Andrews *et al.* (2002) (Ecuación 1) y se clasificó, según Cantú *et al.* (2007).

$$ICSA = \frac{\sum n_1 + n_2 + n_3 + n_n}{N} \quad \text{ecuación 1}$$

Donde:

n_n : Valor normalizado indicador n

N: Número total de indicadores de CMD

Muestreo forestal. El grado de conservación en los relictos de BST se determinó a partir de tres unidades de muestreo, denominados conglomerados, establecidos bajo la metodología del IDEAM (2018), en los que se midieron las variables diámetro a la altura del pecho (DAP) y altura total por individuo. Para las categorías, fustal y fustal grande se determinó la abundancia, frecuencia, dominancia y el índice de valor de importancia simplificado (IVIS). En brinzales y latizales se calculó abundancia y frecuencia relativa, así como índices de diversidad biológica.

La estructura vertical se calculó de acuerdo con el valor fitosociológico por estrato y especie, para posteriormente obtener la posición sociológica absoluta y relativa; al final, se calculó el índice de valor de importancia ampliado (IVIA), para analizar la importancia ecológica de las especies en todas las categorías diamétricas (Melo & Vargas, 2003; Kees *et al.* 2021).

Análisis multicriterio. Los datos generados del muestreo del forestal fueron analizados a partir de siete indicadores, conformados por cuatro verificadores, valorados en una escala de 1 a 3, donde 1 correspondió al más bajo estado del verificador y 3, al mejor, metodología adaptada de CINFA (2006) (Tabla 1). El estado de conservación ideal estaría dado por una puntuación máxima de 84, equivalente al 100 % y, sobre el cual, se definieron rangos, así: 0 – 33,3 %, baja conservación; 33,4 – 66,6 %, regular conservación y 66,7 – 100 %, buena conservación.

Análisis estadístico. Los datos obtenidos del instrumento de campo fueron procesados mediante estadística descriptiva de tendencia central. Para las propiedades del suelo, inicialmente, se validaron supuestos de normalidad, mediante la prueba de Shapiro-Wilk; seguido, se aplicó la prueba de Kruskal-Wallis, para establecer diferencias significativas ($p < 0,05$) entre las propiedades del suelo y conformar el conjunto mínimo de datos (CMD), que fue posteriormente normalizado en rangos de 0 a 1, mediante funciones de puntuación no lineal. Por último, los indicadores del suelo y del BST se sometieron a una prueba de correlación de Pearson, para evaluar su relación y las implicaciones que esto tiene, sobre la gestión integral del patrimonio edáfico y forestal en la zona de estudio.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización unidades de producción familiar rural

Estructura familiar y educación. La estructura de las familias presentes en las (UPFR) se conforman de padres y cuatro hijos, en un 54 %; el 12,5 %, por padres y más de cuatro hijos y un 33,3 %, por personas solas y estructuras diferentes al patrón normal (padres e hijos), donde conviven abuelos, nietos, tíos e hijos, entre otros.

La cobertura en educación básica y media es del 77,6 % y el acceso a niveles de formación profesional es bajo, solo el 8,2 % de la muestra tuvo esta posibilidad de estudio. Al respecto, López Ramírez (2006) y Pérez Pinzón (2021) indican que los niveles de cobertura en educación son precarios para el sector rural en Colombia y limitan en comunidades juveniles rurales proyectos de vida a largo plazo.

Tenencia, extensión y usos de la tierra. La tenencia y habitabilidad de las UPFR por propietarios se dio en el 50 % de los predios; las restantes fincas habitadas corresponden a vivientes o aparceros, donde se establecen acuerdos previos de remuneración económica por su uso en un tiempo determinado, modalidades de tenencia que, Triviño Bedoya *et al.* (2020), reportan como predominantes en la región Andina; sin embargo, es reflejo del problema de acceso a tierras en esta región del país.

Tabla 1. Indicadores y verificadores empleados análisis multicriterio, para estimar la conservación del Bosque Seco Tropical (BST) en cada conglomerado, vereda Juncal del municipio de Enciso - Santander, Colombia.

Indicador	Verificador
Estructura del conglomerado	Presencia estratos en la vegetación actual
	Índice valor de importancia ampliado
	Homogeneidad del bosque
	Regeneración natural
Composición florística	Presencia de especies nativas
	Presencia de especies invasoras
	Grado de amenaza de las especies
	Riqueza florística específica
Manejo sostenible del bosque	Producción de bosque nativo (abundancia especies maderables)
	Provisión de servicios ecosistémicos
	Producción de bosque nativo (diversidad de especies maderables)
	Agentes tensionantes del bosque
Población asociada	No. de personas dependientes directamente del conglomerado
	Presencia de actividades económicas diferentes al uso del bosque
	Presencia de caminos que se transitan indiscriminadamente dentro del conglomerado
	Presencia de personas que hacen extracción esporádica de productos y sub-productos del conglomerado del bosque
Matriz del conglomerado y su entorno	Cultivos y pastos en la zona de amortiguamiento
	Presencia de áreas degradadas circundantes al conglomerado
	Presencia de afloramientos rocosos en el conglomerado
	Presencia de áreas deforestadas en el área circundante al conglomerado
Presencia de fuentes de agua en el relicto y su área aledaña (1 km)	Presencia de nacimientos de agua
	Presencia de corrientes de agua
	Estacionalidad de agua en quebradas
	Estacionalidad de agua en nacimientos
Problemática socioambiental	Conflicto por actividad de minería
	Conflicto por uso agropecuario
	Conflicto por disponibilidad del recurso hídrico
	Conflicto por tenencia de la tierra

La extensión de predios en un 80 % corresponde a minifundios entre 1 a 3 ha y concuerda con Segrelles Serrano (2018) & Pachón Ariza (2021), para quienes este patrón de extensión de predios es común en el país y se concentra mayormente en regiones, como la Andina. El uso agrícola se dio en lotes de 1 a 2 ha, donde se establecen cultivos de mango, maracuyá, plátano, tomate, melón y yuca, cuyo manejo es agroquímico en fertilización y control fitosanitario. La cría de bovinos, aves, cerdos y caprinos, en promedio, se desarrollan en 1 ha y son implementadas por generar retornos de inversión rápidos y flujos de caja frecuentes. Las actividades agropecuarias no tienen registro de inversiones en cada uno de los ciclos de producción, ni tampoco cuentan con infraestructura tecnificada, situación igualmente reportada por Castro-Castro *et al.* (2021), en fincas de Lebrija, Santander, donde estos aspectos se identifican como limitantes de la sostenibilidad económica.

Condiciones económicas. La participación de la población juvenil en las actividades productivas se percibió como favorable para la rentabilidad de las fincas en la zona, esto coincide con Rojas-Cano *et al.* (2021) y Sandoval Genovez *et al.* (2022), quienes consideran que los jóvenes rurales son actores vitales en la dinámica económica de las fincas; sin embargo, en ocasiones no se da por la dificultad que implica el relevo generacional.

Como estrategia para mitigar costos, en la vereda son frecuentes los acuerdos de cooperación entre fincas donde se benefician todos los productores, al permitirles intercambiar mano de obra o herramientas. Bajo este contexto, el 83 % de los habitantes manifiestan que las actividades productivas desarrolladas les permiten disponer de los recursos necesarios para suplir demandas básicas, sin que esto implique un nivel alto de solvencia económica.

También, reconocen que las condiciones pueden ser mejores, pero los altos precios de insumos y materias primas, así como los bajos precios de venta en algunas épocas, comprometen las ganancias.

Relaciones de los habitantes con los recursos naturales. La protección y conservación de los recursos naturales se enfoca al cuidado del agua y la siembra de árboles en rondas hídricas, iniciativas que, para Andrade C. *et al.* (2017), son frecuentes en comunidades rurales de zonas secas del trópico y valoradas por el aporte de servicios ecosistémicos. Los residuos de cosecha son aprovechados en el 80 % de las fincas para la producción de abonos orgánicos empleados en cultivos; no obstante, el volumen de estos materiales no es alto, por tanto, no es tenido en cuenta como un insumo constante para adecuar los suelos. Respecto del BST, los habitantes reconocen la presencia del ecosistema en sus fincas, donde no supera 1 ha y lo valoran como hábitat de fauna y flora local.

El vínculo directo con el BST se dio por el uso que hacen de la leña de forma selectiva para la preparación de alimentos y que, Ramírez Quirama & Tabora Vergara (2014), reportan como una actividad común en la región Andina, donde aún se depende de estos combustibles. Finalmente, la vereda no cuenta con un programa de asistencia técnica, que permita a los cultivadores, mejorar la relación de uso del suelo con las actividades productivas, en un

marco que contribuya al manejo integral y sostenible del territorio y los recursos naturales.

Indicadores del suelo y conjunto mínimo de datos

Los resultados de la prueba de Kruskal-Wallis mostraron diferencias significativas ($p < 0,05$) para cinco indicadores físicos (HG, HV, Pt, Da y Dr) y dos químicos (CO, Mg), a partir de los cuales, se conformó el conjunto mínimo de datos (CMD) (Tabla 2), similar a lo reportado por Valbuena-Calderón *et al.* (2017), quienes, en suelos bajo diferentes manejos al sur de Colombia, no incluyen indicadores biológicos en el CMD.

Condición de calidad del suelo. La calidad del suelo se clasificó según el ICSA en el BST como alta (0,8), contrario al manejo agrícola donde fue moderada (0,5) (Tabla 3). Estos valores que coinciden con Aguirre-Forero *et al.* (2018), quienes estudiaron la calidad del suelo para estos manejos en la región Caribe de Colombia. El resultado de calidad del suelo en el manejo forestal no fue el óptimo esperado para una cobertura considerada por Paz-Kagan *et al.* (2014), Guo *et al.* (2018) y Zeraatpisheha *et al.* (2020), referente de calidad respecto de otras tipologías de manejo, donde la intervención antrópica es constante sobre el suelo.

Tabla 2. Valores medios de indicadores químicos, físicos y biológicos del suelo, en manejo agrícola y forestal vereda Juncal del municipio de Enciso - Santander, Colombia.

Manejo	pH	CO	P	Ca	Mg	Na	K	CIC	CE	HG	HV	Pt	Da	Dr	# Ind
		%	meq/100g						mhos/cm	%			g/cm³		
Agrícola	6,37a	1b	35,33a	7,5a	1,46b	0,03a	0,33a	9,87a	0,08a	3,03b	4,16b	60,0b	1,0a	2,5a	21,67a
Forestal	6,07a	2,43a	21,07a	10,21a	3,19a	0,05a	0,75a	14,93a	0,1a	13a	12,55a	43,0a	1,3b	2,1b	31,33a

Profundidad de muestreo: 0 - 30 cm. pH: potencial de hidrógeno en agua, CO: carbono orgánico, P: fósforo, Ca: calcio, Mg: magnesio, Na: sodio, K: potasio, CIC: capacidad de intercambio catiónico, CE: conductividad eléctrica, HG: humedad gravimétrica, HV: humedad volumétrica, Pt: porosidad total, Da: densidad aparente, Dr: densidad real, #Ind: número de individuos del suelo.
Valor medio con igual letra no presentan diferencia significativa entre manejos. Prueba de Kruskal-Wallis ($p < 0,05$).

Tabla 3. Indicadores de la calidad del suelo en manejos agrícola y forestal, vereda Juncal municipio de Enciso - Santander, Colombia.

Indicador	Vn manejo agrícola	Vn manejo forestal	ICSA manejo agrícola	ICSA manejo forestal
CO %	0,3	0,7	0,5	0,8
Mg meq/100g	0,3	0,7		
HG %	0,5	0,7		
HV %	0,2	0,7		
Pt %	0,3	0,9		
Da g/cm ³	1	1		
Dr g/cm ³	1	1		

CO: carbono orgánico, Mg: magnesio, HG: humedad gravimétrica, HV: humedad volumétrica, Pt: porosidad total, Da: densidad aparente, Dr: densidad real.

Los indicadores en el BST fueron más homogéneos al presentar valores de normalidad entre 0,7 a 1; sin embargo, CO, Mg, HG y HV se clasifican en alta calidad, nivel anterior al óptimo esperado, resultado asociado a bajos aportes de materia orgánica, así como del déficit hídrico, que caracteriza el bosque en el trópico seco (Muñoz-Rojas *et al.* 2021). De igual forma, la extracción de leña puede ser un factor que influyó sobre la calidad del suelo, al realizarse sin un manejo silvicultural, que evite el desequilibrio de la composición y estructura del BST, aspectos importantes en la dinámica del carbono.

El suelo con manejo agrícola presentó valores inferiores normalizados respecto del BST, para CO, Mg, HG, HV y Pt; en este caso, las condiciones son críticas y repercuten en la relación nutricional suelo-planta, estabilidad del pH, disponibilidad hídrica y la estabilidad de agregados, aspectos que, según Núñez-Ravelo *et al.* (2021), pueden ser revertidos si el suelo contara con mayores contenidos de CO; no obstante, el contexto de manejo social y técnico, así como el tipo de coberturas implementadas en la vereda Juncal no lo permiten, al ser una actividad productiva sin planificación y desarrollada bajo modelos de cultivo tradicionales.

Respecto de la HG, HV, Pt y Mg, este manejo evidenció cómo la conversión del suelo forestal a cultivos transitorios modificó los

contenidos de humedad y dificultan el equilibrio hídrico en estas zonas, donde las pérdidas por evapotranspiración pueden causar impactos negativos sobre el suelo y las coberturas implementadas. El manejo agrícola se caracterizó por un alto grado de compactación del suelo y coincide con Yang *et al.* (2022), para quienes las prácticas convencionales de manejo implementadas en suelos agrícolas promueven esta condición que impacta el funcionamiento mecánico del recurso, así como la productividad de los cultivos establecidos.

Conservación relictos bosque seco tropical. El análisis multicriterio no evidenció un estado ideal de conservación para ningún conglomerado (Figura 2). El mayor porcentaje se presentó en CG2, con 80,95 % y lo clasifica en estado bueno de conservación, al igual que CG1, con 73,81 %; en cambio, el panorama difiere para CG3, con 60,71 %, rango que lo ubica como bajo. El conglomerado CG2 presentó los valores más cercanos a las condiciones ideales planteadas en cada indicador, donde la presencia de tres estratos, número similar de individuos en latizales y fustales y la regeneración natural fueron aspectos que explican esta condición. Esto concuerda con los reportes de Herazo Vitola *et al.* (2017), quienes, para la región de los Montes de María en Sucre, Colombia, clasificaron en buen estado de conservación bosques con estratos arbóreos definidos y presencia de sotobosque.

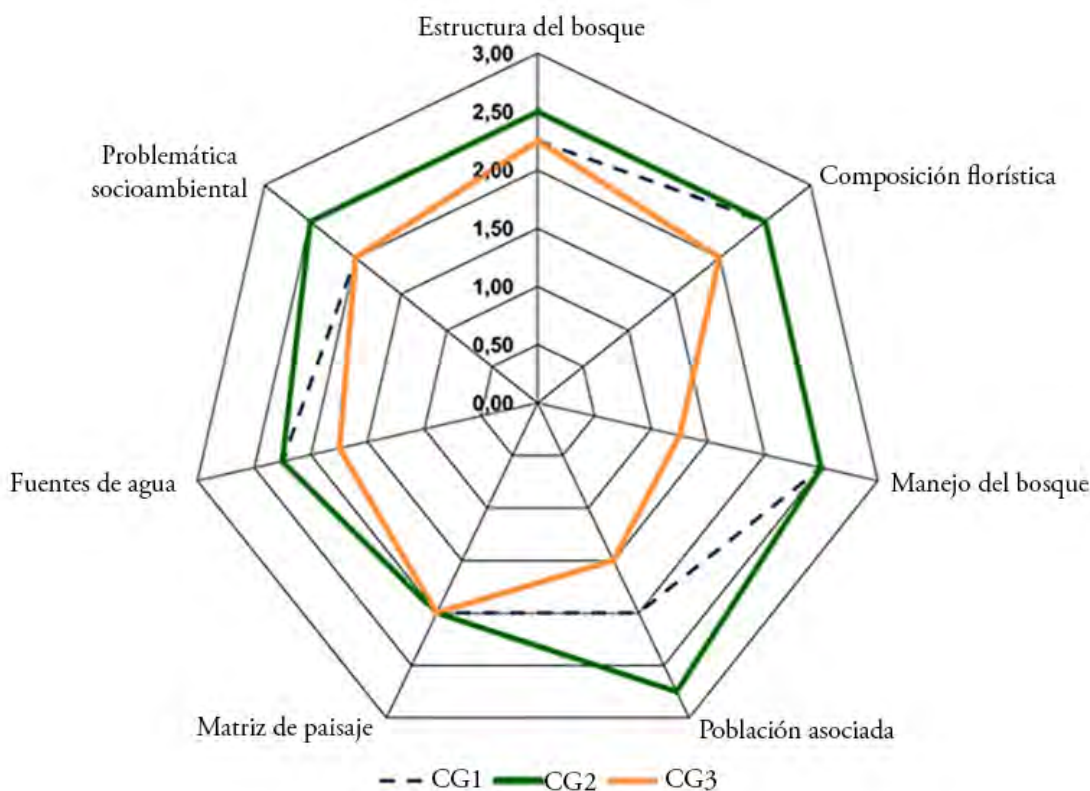


Figura 2. Indicadores de conservación del Bosque Seco Tropical (BST), vereda Juncal, municipio de Enciso - Santander, Colombia.

CG1, CG2, CG3: Conglomerados 1, 2 y 3.

Los tres conglomerados presentaron valores de IVIA no mayores al 50 %, considerado alto sobre una base de interpretación promedio de 53,2 %. Las especies más representativas por conglomerado fueron *Amyris sylvatica* Jacq, 100 %, en CG2; *Piptadenia* sp., 100 %, en CG1 y en CG3 *Neltuma juliflora* (Sw.), reportadas en los estudios de Pizano & García (2014), Pardo & Moreno, (2018) y Quiroga *et al.* (2019), quienes las catalogan como estratégicas para la conservación de los bosques secos en Santander.

Los conglomerados presentaron una tendencia a la homogeneidad con valores de CM entre 0,10 y 0,30 y los índices de diversidad alfa, reflejaron baja diversidad de especies. Respecto a la composición florística, los conglomerados presentaron entre 8 a 12 especies; en CG1 y CG2 se observó mayor riqueza florística de especies nativas y ausencia de invasoras, a diferencia de CG3, donde se identificó espino de cabro *Vachellia farnesiana* (FJ Herm.) Seigler & Ebinger.

La valoración de bienes y servicios ecosistémicos fue alta en los conglomerados CG2 y CG1, donde se identificó la importancia estratégica que tiene el BST en la calidad de vida de las comunidades campesinas. Con relación a los agentes tensionantes, solo CG2 no reportó alguno de los tensionantes del análisis. El manejo no estabulado de caprinos se identificó como el más crítico tensionante para la zona y solo se presentó en CG1. Al respecto, Pizano & García (2014) reportan el manejo no estabulado de caprinos, a nivel nacional, como un tensionante que causa, a corto plazo, la homogenización del bosque, por afectación en la regeneración natural. Para este conglomerado no se reportan caminos internos de tránsito de habitantes, contrario a CG3, donde fueron identificados caminos internos y externos que, según Santibañez-Andrade *et al.* (2015), repercuten sobre la estructura y la composición del bosque, al facilitar el ingreso de especies invasoras y el incremento de otros tensionantes, aspectos, sobre los cuales, es necesario adelantar acciones de gestión ambiental, que permitan su control y mitigación.

La población asociada cumple un papel determinante en los conglomerados, por la relación de uso que se da con el componente forestal. Para Cárdenas-Camacho *et al.* (2021) es un indicador donde el rol de las comunidades es relevante por la contribución que estas hacen a la conservación BST, razón por la cual, debe ser objeto de fortalecimiento dentro de la gestión de tierras. El conglomerado CG3 tuvo la mayor presencia de habitantes, con 20 hab/km², para CG1 y CG2 este indicador fue de 10 y 15, respectivamente, situación que, en el caso del CG3, se atribuye a la existencia de una ruta secundaria de tránsito constante que atraviesa gran parte del conglomerado y permite el acceso a las viviendas.

Para la matriz del conglomerado y su área circundante, se identificaron condiciones similares en los CG1 y CG2, relacionadas con la degradación y la fragmentación percibida. Se observó, una afectación mediana inferida por áreas de pastoreo y en menor proporción a cultivos, condición que genera impacto visual favorable del conglomerado, al distinguirse la cobertura forestal.

En el CG3 se observó una mayor afectación de este indicador, por tratarse de áreas en estado de abandono, con manejo limitado del suelo y predominio de estructuras semiabiertas y herbazales. Además, se tuvieron en cuenta las problemáticas socioambientales diferenciadas para cada conglomerado y su área aledaña. Para los CG2 y CG3, no se identificaron problemáticas; caso contrario, se identificó en el CG1, donde se adelantan actividades mineras, como fabricación de ladrillo y extracción de carbón, que impactan el paisaje.

Relación indicadores BS -T y edáficos. La correlación entre indicadores forestales y del suelo mostró una relación directa y significativa ($r \geq 0,8$) de la estructura del BST, la población asociada y la problemática socioambiental (Figura 3), respecto de la Pt y Da, para el suelo agrícola y el CO, Mg, HG y HV, en suelo forestal, resultado que coincide con lo encontrado por Aguirre *et al.* (2019), quienes reportan el aumento de la Da en función de la presión antrópica en zonas secas del trópico, a causa de manejos agrícolas implementados bajo modelos no sostenibles, como los identificados en la vereda Juncal. Del mismo modo, el contenido de CO es producto de la forma de uso del BST, que hacen comunidades rurales sobre este manejo. En tal sentido, González-Pedraza & Dezzio (2011) coinciden en la función que cumple en el suelo esta propiedad al mejorar múltiples procesos internos vitales para su conservación y reconocen que su presencia está asociada a los tres indicadores, reportados en el presente estudio.

Respecto del contenido de humedad, los resultados concuerdan con los encontrados por Díaz (2006), para quien la estructura del bosque depende de la humedad del suelo, al incidir en su crecimiento y desarrollo, más aún, en las condiciones de estacionalidad hídrica, donde está presente el ecosistema, que se puede extender por ocho meses. Las variables, en general, no muestran correlación lineal negativa perfecta ($r = -1$); sin embargo, se presentaron algunas correlaciones inversas entre indicadores del manejo agrícola del suelo.

Los resultados del estudio permiten concluir que las comunidades campesinas de la vereda Juncal dependen de actividades agrícolas de pequeña escala productiva; sin embargo, el contexto en que las desarrollan no es el óptimo en términos de sostenibilidad. La evaluación de calidad del suelo mostró cómo el manejo forestal puede ser asumido como contraste, respecto de un manejo agrícola que afecta al recurso suelo, según los hallazgos de la Pt, HG, HV, CO, Da y Dr, indicadores que reflejaron esta condición.

Por último, la relación comunidad y suelo evidencia cómo las actividades antrópicas influyen sobre el estado de conservación de los relictos de BST y el suelo en esta región de Santander, información, sobre la cual, se pueden establecer lineamientos de gestión integral de patrimonio ambiental, edáfico y forestal.

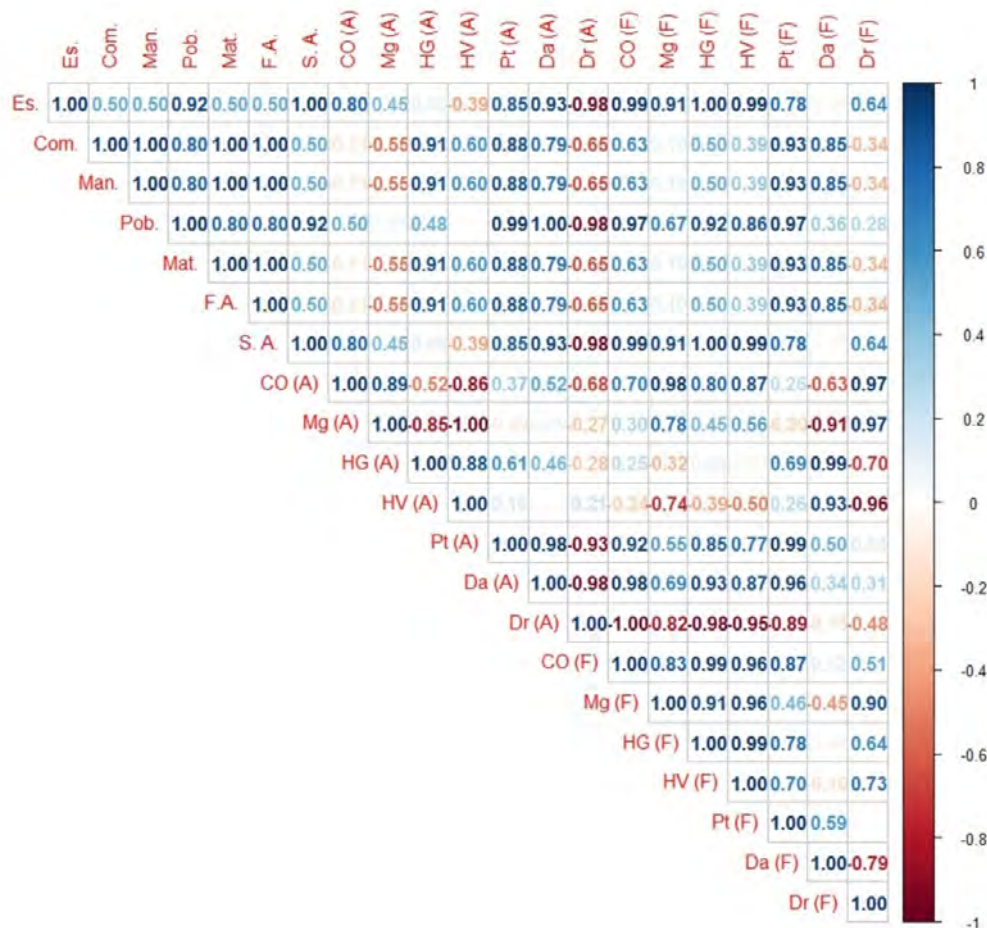


Figura 3. Correlograma de Pearson ($p \geq 0,05$) de los indicadores del Bosque Seco Tropical (BST).

Es: Estructura del bosque, Com: Composición florística, Man: Manejo del bosque, Pob: Población asociada, Mat: Matriz de paisaje, F.A: Fuentes de agua, S.A: Problemática socioambiental. Indicadores suelo. CO: Carbono Orgánico, Mg: Magnesio, HG: Humedad Gravimétrica, HV: Humedad Volumétrica, Pt: Porosidad Total, Da: Densidad Aparente, Dr: Densidad Real. A: Manejo agrícola, F: Manejo forestal.

Agradecimientos. A los habitantes de la vereda Juncal, por su apoyo y colaboración durante la fase de campo. Contribuciones de los autores. Belcy Viviana Gómez Pacheco: investigación y metodología; Cristian Guerrero Valderrama: investigación y metodología; Doris Duarte Hernández: investigación y supervisión; Ricardo Andrés Oviedo Celis: conceptualización, investigación y redacción - borrador original. Conflicto de intereses. Los autores manifiestan no tener ningún tipo de conflicto que comprometa los resultados generados del estudio. Su construcción es producto del trabajo colectivo y están de acuerdo con su publicación.

REFERENCIAS

- AGUIRRE, S.E.; PIRANEQUE, V.; DÍAZ, C.J. 2019. Valoración del estado del suelo en zona de bosque seco tropical mediante técnicas analíticas y cromatogramas. *Información Tecnológica*. 30(6):337-350. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642019000600337>
- AGUIRRE-FORERO, S.; PIRANEQUE-GAMBASICA, N.V.; VÁSQUEZ-POLO, J.R. 2018. Características edáficas y su relación con usos del suelo en Santa Marta, Colombia. *Entramado*. 14(1):242-250.
- ALVARADO-SOLANO, D.P.; OTERO OSPINA, J.T. 2015. Distribución espacial del bosque seco tropical en el Valle del Cauca, Colombia. *Acta Biológica Colombiana*. 20(3):141-153. <http://dx.doi.org/10.15446/abc.v20n2.46703>.
- ANDRADE, C.H.; SEGURA, M.M.A.; SIERRA, R.E. 2017. Percepción local de los servicios ecosistémicos ofertados en fincas agropecuarias de la zona seca del norte del Tolima, Colombia. *Revista Luna Azul*. 45:42-58. <https://doi.org/10.17151/luaz.2017.45.4>
- ANDREWS, S.; KARLEN, D.; MITCHELL, J. 2002. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 90(1):25-45. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00174-8](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00174-8)
- BANDA-R, K.; WEINTRITT, J.; GÓMEZ, M. 2015. Bosque seco tropical. Proyecto DryFlor. Ed. Red Florística del Bosque Seco Tropical. Alemania. 28p.

- BERDUGO-LATTKE, M.; RANGEL-CH, J. 2015. Composición florística del bosque tropical seco del santuario “Los Besotes” y fenología de especies arbóreas dominantes (Valledupar, Cesar, Colombia). *Colombia Forestal*. 18(1):87-103. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2015.1.a05>
- CANTÚ, M.; BECKER, A.; BEDANO, J.; SCHIAVO, H. 2007. Evaluación de la calidad del suelo mediante el uso de indicadores e índices. *Ciencia del suelo*. 25(2):173-178.
- CÁRDENAS-CAMACHO, L.; DÍAZ, S.; GÓMEZ-ANAYA, W.; ROJAS-ROJAS, J.; LÓPEZ-CAMACHO, R. 2021. Análisis participativo de servicios ecosistémicos en un área protegida del bosque seco tropical (Bs-T), Colombia. *Colombia Forestal*. 24(1):123-156. <https://doi.org/10.14483/2256201X.16548>
- CASTRO-CASTRO, M.L.; BELTRÁN-DÍAZ, A.; VARGAS-ESPÍTIA, A. 2021. Análisis sistémico de la sostenibilidad económica de unidades de producción agropecuaria familiar en una comunidad campesina de Lebrija, Colombia. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*. 34(2):141-153. <http://doi.org/10.17163/lgr.n34.2021.10>
- CENTRO INFORMÁTICO DE GEOMÁTICA AMBIENTAL, CINFA. 2006. Informe de evaluación del estado de conservación de los bosques y áreas de vegetación protectora de Loja y Zamora Chinchipe, Fondo Ambiental Nacional. Loja, Ecuador. 350p
- DÍAZ, J. 2006. Bosque seco tropical Colombia. Ed. I/M Editores. Colombia. 250p.
- GARCÍA, H.; GONZÁLEZ, R. 2019. Bosque seco Colombia: biodiversidad y gestión. Ed. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Colombia. 32p.
- GONZÁLEZ-PEDRAZA, A.; DEZZEO, N. 2011. Efecto del cambio de bosque a pastizal sobre las características de algunos suelos en los llanos occidentales de Venezuela. *Interciencia*. 36(2):135-141.
- GUO, S.; HAN, X.; LI, H.; WANG, T.; TONG, X.; REN, G.; FENG, Y.; YANG, G. 2018. Evaluation of soil quality along two revegetation chronosequences on the Loess Hilly Region of China. *Science of the Total Environment*. 633:808-815. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.210>
- HERAZO VITOLA, F.; MERCADO GÓMEZ, J.; MENDOZA CIFUENTES, H. 2017. Estructura y composición florística del bosque seco tropical en los Montes de María (Sucre-Colombia). *Ciencia en desarrollo*. 8(1):71-82.
- INSTITUTO DE HIDROLOGÍA METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES, IDEAM. 2018. Manual de Campo Inventario Forestal Nacional Colombia. Ed. IDEAM. Colombia. 160p.
- KEES, S.; TORRES, S.; MORALES, A.; GIRAUDO, L.; RUIZ, S.; GIODARNO, M.; GALEANO, V.; KLOSTER, N.; KRONEMBERGER, R. 2021. Caracterización de la estructura y composición florística de dos tipos forestales del noroeste de la provincia del Chaco. *Revista de ciencias forestales Quebracho*. 29(1):39-49.
- KYOK, M.; NGARA, T.; TANABE, K. 2006. Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra (eds). Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases efecto invernadero. Ed. IPCC (Francia). 50p.
- LÓPEZ RAMÍREZ, L. 2006. Ruralidad y educación rural. Referentes para un Programa de Educación Rural en la Universidad Pedagógica Nacional. *Revista Colombiana de Educación*. 51:138-159.
- MELO, O.; VARGAS, R. 2003. Evaluación ecológica y silvicultural de ecosistemas boscosos. Ed. Universidad del Tolima. Colombia. 222p.
- MESA-SIERRA, N.; DE LA PEÑA-DOMENE, M.; CAMPO, J.; GIARDINA, C.P. 2022. Restoring mexican tropical dry forests: A national review. *Sustainability*. 14(7):3937. <https://doi.org/10.3390/su14073937>
- MILES, L.; NEWTON, A.; DEFRIES, R.; RAVILIOUS, C.; MAY, I.; BLYTH, S.; KAPO, V.; GORDON, J. 2006. A global overview of the conservation status of tropical dry forests. *Journal of Biogeography*. 33(3):491-505. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2005.01424.x>
- MUÑOZ-ROJAS, M.; DELGADO-BAQUERIZO, M.; LUCAS-BORJA, M.E. 2021. La biodiversidad y el carbono orgánico del suelo son esenciales para revertir la desertificación. *Ecosistemas*. 30(3):2238. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2238>
- NÚÑEZ-RAVELO, F.; UGAS-PÉREZ, M.; CALDERÓN-CASTELLANOS, R.; RIVAS-MERIÑO, F. 2021. Cuantificación del carbono orgánico, y materia orgánica en suelos no rizosféricos o cubiertos por *Avicennia germinans* (L.) y *Conocarpus erectus* (L.). *Revista Geográfica de América Central*. 1(66):340-366. <https://doi.org/10.15359/rgac.66-1.13>
- ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA, FAO. 2020. El estado de los bosques del mundo los bosques, la biodiversidad y las personas. Ed. FAO. Italia. 224p.
- OVIEDO-CELIS, R.; CASTRO-ESCOBAR, E. 2021. Un análisis comparativo de la sostenibilidad de sistemas para

- la producción de café en fincas de Santander y Caldas, Colombia. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*. 22(3):e2230. https://doi.org/10.21930/rcta.vol22_num3_art:2230
- PACHÓN ARIZA, F. 2021. Distribución de la propiedad rural en Colombia en el siglo XXI. *Revista de Economía e Sociología Rural*. 60(04):e242402. <https://doi.org/10.1590/1806-9479.2021.242402>
- PARDO, M.; MORENO, R. 2018. El enclave seco del cañón del Chicamocha: biodiversidad y territorio. Ed. Fundación Natura. Colombia. 192p.
- PAZ-KAGAN, T.; SHACHAK, M.; ZAADY, E.; KARNIELI, A. 2014. A spectral soil quality index (SSQI) for characterizing soil function in areas of changed land use. *Geoderma*. 230-231:171-184. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.04.003>
- PÉREZ PINZÓN, L. 2021. Políticas educativas para el emprendimiento rural en Colombia. *Reflexión Política*. 23(47):60-71. <https://doi.org/10.29375/01240781.4098>
- PIZANO, C.; GARCÍA, H. 2014. El bosque seco tropical en Colombia. Ed. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt, Bogotá, Colombia. 353p.
- QUIROGA, J.; ROA, H.; MELO, O.; FERNÁNDEZ, F. 2019. Estructura de fragmentos de bosque seco tropical en el sur del departamento del Tolima, Colombia. *Boletín Científico. Centro de Museos Museo de Historia Natural*. 23(1):31-51. <https://doi.org/10.17151/bccm.2019.23.1.2>
- RAMÍREZ QUIRAMA, J.; TABORDA VERGARA, A. 2014. Consumo de leña en fogones tradicionales en familias campesinas del oriente antioqueño. *Producción + Limpia*. 9(1):99-114.
- ROJAS-CANO, A.; FEIJOO MARTÍNEZ, A.; MOLINA-RICO, J.; ZÚÑIGA-TORRES, C.; QUINTERO VARGAS, H. 2021. Caracterización de agricultores y estrategias conducentes a políticas públicas en el eje cafetero colombiano. *Revista Colombiana de Ciencias Sociales*. 12(1):165-192. <https://doi.org/10.21501/22161201.3476>
- SANDOVAL GENOVEZ, D.; MOCTEZUMA PÉREZ, S.; HERRERA TAPIA, F.; ESPINOZA ORTEGA, A. 2022. Juventudes rurales: una perspectiva del trabajo agrícola desde sus actores. *Convergencia. Revista de Ciencias Sociales*. 29:e16508. <https://doi.org/10.29101/crcs.v29i0.16508>
- SANTIBAÑEZ-ANDRADE, G.; CASTILLO-ARGÜERO, S.; MARTÍNEZ-OREA, Y. 2015. Evaluación del estado de conservación de la vegetación de los bosques de una cuenca heterogénea del Valle de México. *Bosque Valdivia*. 36(2):299-313. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002015000200015>
- SEGRELLES SERRANO, J.A. 2018. La desigualdad en el reparto de la tierra en Colombia: Obstáculo principal para una paz duradera y democrática. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*. 38(2):409-33. <http://dx.doi.org/10.5209/AGUC.62486>
- SUÁREZ-R., S.; VARGAS-R., O. 2019. Composición florística y relaciones ecológicas de las especies de borde, parches y árboles aislados de un bosque seco tropical en Colombia. Implicaciones para su restauración ecológica. *Caldasia*. 41(2):28-41. <https://doi.org/10.15446/caldas.v41n1.71281>
- TRIVIÑO BEDOYA, C.; CÓRDOBA VARGAS, C.; TORO CALDERÓN, J. 2020. Tenencia de la tierra y relaciones de producción. Dimensiones ineludibles en la resiliencia de campesinos (Municipio de Marulanda, Caldas-Colombia). *Cuadernos de Desarrollo Rural*. 17:2-21. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.cdr17.ttrp>
- VALBUENA-CALDERÓN, O.E.; RODRÍGUEZ-PÉREZ, W.; SUÁREZ-SALAZAR, J. 2017. Calidad de suelos bajo dos esquemas de manejo en fincas cafeteras del sur de Colombia. *Revista Agronomía Mesoamérica*. 28(1):131-140. <https://doi.org/10.15517/am.v28i1.21092>
- YANG, P.; DONG, W.; HEINEN, M.; QIN, W.; OENEMA, O. 2022. Soil compaction prevention, amelioration and alleviation measures are effective in mechanized and smallholder agriculture: A Meta-Analysis. *Land*. 11(5):645. <https://doi.org/10.3390/land11050645>
- ZERAATPISHEHA, M.; BAKHSHANDEHB, E.; HOSSEINIC, M.; ALAVI, S. 2020. Assessing the effects of deforestation and intensive agriculture on the soil quality through digital soil mapping. *Geoderma*. 363:114139. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114139>

Evaluación del impacto de las aguas residuales del beneficio húmedo del café en Xicotepec, México

Evaluation of the wastewater impact of coffee wet mill in Xicotepec, Mexico

Gabriela Pérez-Osorio^{1*} ; Fabiola Avelino-Flores² ; Betzabe Hernández-Lorenzo¹ ; José Eligió Moisés Gutiérrez-Arias³ ; José Carlos Mendoza-Hernández¹ ; Yaselda Chavarín-Pineda⁴ 

¹Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Facultad de Ingeniería Química. México; e-mail: betzahernandez16@gmail.com, josecarlos.mendoza@correo.buap.mx

²Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Posgrado en Ciencias Ambientales, Instituto de Ciencias, Centro de Investigaciones en Ciencias Microbiológicas. México; e-mail: fabiola.avelino@correo.buap.mx

³Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de Ciencias de la Electrónica. México; e-mail: jose.gutierrez@correo.buap.mx

⁴Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Centro de Investigación en Ciencias Agrícolas, Instituto de Ciencias. México; e-mail: yaselda.chavarinp@correo.buap.mx

*autor para correspondencia: gabriela.perez@correo.buap.mx

Cómo citar: Pérez-Osorio, G.; Avelino-Flores, F.; Hernández-Lorenzo, B.; Gutiérrez-Arias, J.E.M.; Mendoza-Hernández, J.C.; Chavarín-Pineda, Y. 2025. Evaluación del impacto de las aguas residuales del beneficio húmedo del café en Xicotepec, México. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 28(1):e2717. <http://doi.org/10.31910/rudca.v28.n1.2025.2717>

Artículo de acceso abierto publicado por Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, bajo una Licencia Creative Commons CC BY-NC 4.0

Publicación oficial de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Institución de Educación Superior Acreditada en Alta Calidad por el Ministerio de Educación Nacional

Recibido: junio 26 de 2024

Aceptado: junio 8 de 2025

Editado por: Helber Adrián Arévalo Maldonado

RESUMEN

El municipio de Xicotepec, Puebla, es uno de los principales productores de café en México y cuenta con 978 beneficios, que arrojan sus aguas residuales a los arroyos circundantes, la mayoría sin tratamiento previo. Dichas aguas residuales contienen materia orgánica y contaminantes, que disminuyen el oxígeno disuelto, generan color y malos olores en los cuerpos de agua receptores. Este trabajo evalúa el impacto de las aguas residuales descargadas en el arroyo Nopalutla, por uno de estos beneficios húmedos de café. Se analizaron siete parámetros físicos, diez químicos y dos microbiológicos asociados a la calidad del agua, de acuerdo con la normatividad mexicana correspondiente. Se determinó que las aguas provenientes del procesamiento del café poseen características físicas y químicas, que superaron los límites permitidos en la normatividad mexicana vigente, tales como los sólidos sedimentables y los suspendidos totales, la dureza, la demanda química de oxígeno, el nitrógeno total y los fosfatos, así como la presencia de coliformes totales y fecales. Lo anterior indica un impacto negativo en la calidad del agua del arroyo Nopalutla y un riesgo a la salud de la población aledaña que la usa.

Palabras clave: Arroyo Nopalutla; Beneficio húmedo de café; Calidad del agua; Impacto ambiental; Residuos agrícolas.

ABSTRACT

The municipality of Xicotepec, Puebla is one of the leading coffee producers in Mexico. It has 978 wet coffee processing plants, which discharge their wastewater into the surrounding streams, most of which are without prior treatment. Such wastewater contains organic matter and pollutants, which reduce dissolved oxygen and produce color and foul odors in receiving water bodies. The impact of wastewater discharged into the Nopalutla stream from a wet coffee processing plant in Xicotepec, Puebla was evaluated by analyzing seven physical, ten chemical, and two microbiological characteristics associated with water quality according to Mexican regulations. It was determined that wastewaters from coffee processing showed physical and chemical characteristics that exceeded the limits allowed in current Mexican regulations, such as settleable and suspended solids, hardness, chemical oxygen demand, total nitrogen, and phosphates. As well as the presence of total and fecal coliforms. The above indicates a negative impact on the water quality of the Nopalutla stream and a risk to the health of the surrounding population that uses it.

Keywords: Agricultural waste; Environmental impact; Nopalutla stream; Wet coffee processing plant; Water quality.

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, el café es la segunda bebida de mayor consumo después del agua y se estima que se consumen 2.250 millones de tazas de café diariamente, mientras que en México, se consumen 1,6 kg de café por persona al día.

En México, el 90 % de la producción de café cereza se concentra en cuatro estados: Chiapas, Veracruz, Puebla y Guerrero (SADR, 2020). En el estado de Puebla, el principal productor es el municipio de Xicotepec, que cuenta con 978 productores (Cervantes & Velázquez, 2015). El municipio registra un gran número de arroyos y ríos, donde se descargan las aguas residuales de los beneficios y, en la mayoría de los casos, sin tratamiento previo, lo que genera un impacto ambiental negativo para las comunidades aledañas, que utilizan los arroyos y ríos como suministro de agua potable, para sus actividades cotidianas.

El cafeto es un árbol pequeño o arbusto perteneciente a la familia de las rubiáceas, compuesta por 500 géneros y más de 6.000 especies, la mayoría de origen tropical y con amplia distribución geográfica. Su madera es dura y densa, sus flores son blancas o rosadas y el fruto está formado por dos semillas, cada una con una grieta característica (Herrera Pinilla & Cortina Guerrero, 2013). El fruto del café maduro es de color rojizo y se asemeja a una cereza, de ahí que se le conozca también como café cereza.

El conjunto de operaciones para transformar el fruto del café desde el denominado café cereza hasta la obtención del grano seco (café pergamino), se conoce como “beneficiado de café” y se realiza en instalaciones que cuentan con maquinaria especializada para el recibo, despulpe, fermentación, lavado, clasificación y secado de los granos. Existen dos metodologías para llevar a cabo el proceso de beneficiado, clasificadas según el uso de agua en el proceso: el beneficio húmedo y el beneficio seco (Dadi *et al.* 2018). El beneficiado húmedo es más costoso y requiere más instalaciones, equipo, maquinaria y conocimiento que el método seco; pero el producto que se obtiene por método húmedo es de mejor calidad y su principal requerimiento es un abundante abastecimiento de agua (Rattan *et al.* 2015; Navaz & Roy, 2016).

El beneficiado húmedo es el método de procesamiento de café más utilizado en Centroamérica, México y Colombia. El método surgió como una alternativa para solucionar el problema de la fermentación inmediata y excesiva de los granos en zonas tropicales (Orozco *et al.* 2005). Este tipo de procesado húmedo de café se da, principalmente, cerca de los ríos, debido a que se requiere gran cantidad de agua para el lavado de los granos, para remover la pulpa y el mucílago y, de igual forma, se utiliza el río para la descarga de las aguas residuales. El tema de los residuos generados durante el procesamiento del café es motivo de diversas investigaciones (Ijanu *et al.* 2020). Dependiendo del tipo de proceso, se pueden generar residuos sólidos y semi húmedos, como la piel, pulpa, corteza seca del grano, además del agua residual, por lo que, en diversas investigaciones, se analizan perspectivas sustentables para su tratamiento (Cássia Campos *et al.* 2021).

En uno de los beneficios húmedos de café en el municipio de Xicotepec - Puebla, México, se procesan cada año alrededor de 3 a 4 toneladas

diarias de café cereza, entre septiembre y abril. Este beneficio utiliza el agua del arroyo Nopalutla, un afluente de agua limpia cercano a la ubicación del beneficio que, a lo largo de su cauce, sirve para dar de beber al ganado, regar los árboles que crecen en invernaderos situados a las orillas y en su paso cerca del beneficio es transportado mediante una bomba al interior, para lavar el café.

Al llevar a cabo el proceso de beneficiado húmedo se generan dos subproductos: la pulpa del café y las aguas residuales, llamadas aguas mieles que, si no se aprovechan o disponen adecuadamente, se convierten en fuentes importantes de contaminación ambiental. En el beneficio de café no se ha medido el gasto de agua que se emplea en el proceso de lavado y aunque el despulpado de los granos y el transporte de la pulpa se llevan a cabo en seco, lo cual, reduce un 75 % el potencial contaminante de los subproductos, en las instalaciones tradicionales de beneficio húmedo para lavar café, se registran consumos de agua entre 20 y 30 L por kg de café pergamino seco. En la literatura se han reportado consumos de hasta 45,5 L de agua por kg de café (Rodríguez Pérez *et al.* 2000). Además del uso desmedido del agua durante el proceso de beneficiado húmedo, este beneficio de café no cuenta con un tratamiento previo para el uso del agua de lavado ni al final de dicho proceso, por lo que las aguas mieles son descargadas sin tratamiento alguno al mismo arroyo, pero aguas abajo.

Las descargas a cielo abierto de aguas residuales procedentes de los beneficios húmedos de café son una práctica frecuente en los principales estados cafeteros de México; en Chiapas es muy común encontrar residuos procedentes de los beneficios húmedos en los cuerpos de agua, debido a la ineficiente disposición y abundancia de equipos obsoletos con que cuentan la mayoría de los productores de café. En Veracruz, el panorama es muy similar; en la región centro, las 90 industrias cafeteras, registradas hasta el 2004, descargaban 171,63 Mm³ de aguas residuales, de los cuales, sólo trataban 24,51 Mm³ (Ruelas Monjardín *et al.* 2020); sin embargo, esta situación se puede observar en varios países productores de café, como es el caso de Etiopía, en donde hay 18 ríos que reciben las descargas del procesamiento de café, generando agotamiento del oxígeno disuelto y, como consecuencia, la disminución considerable de macroinvertebrados (Beyene *et al.* 2012).

Debido a que las descargas de aguas mieles aportan color y materia orgánica (principalmente pectinas, proteínas y azúcares), se producen malos olores y se modifican las características fisicoquímicas del cuerpo de agua receptor (Dadi *et al.* 2018; Ijanu *et al.* 2020). Además, estas descargas también contienen nutrientes que pueden generar la eutrofización de los cuerpos de agua receptores, por lo que es importante cuantificar los parámetros de nitrógeno y fósforo, que están expuestos a la acción de agentes microbiológicos. En el caso presentar altas concentraciones de nitratos, se asume que se debe a la desaminación del nitrógeno amoniacal por bacterias, mientras que los fosfatos, por su parte, pueden estar presentes en altas concentraciones por los diferentes tipos de máquinas despulpadoras, el tiempo de fermentación y la cantidad de agua utilizada en el proceso. En general, los nutrientes (nitrógeno y fósforo) en altas concentraciones representan un riesgo de eutrofización para los cuerpos de agua, localizados aguas abajo, afectando a los residentes cercanos y ecosistemas acuáticos.

En cuanto a otros parámetros fisicoquímicos, el pH por debajo de 7 de las descargas de los beneficios de café resulta tóxico para los organismos acuáticos, mientras que la conductividad eléctrica es un indicador de la calidad del agua, asociado a los sólidos totales disueltos presentes en el agua. El aumento de ambos parámetros en las aguas residuales del procesamiento de café se debe a la etapa del despulpado y a la fermentación de los azúcares en el mucilago, lo que, a su vez, produce alcohol y CO_2 , lo que favorece la disminución del pH en las aguas residuales (Dadi *et al.* 2018).

En este trabajo de investigación, se realiza una caracterización fisicoquímica y microbiológica del agua del río antes, en el punto de descarga y después de las descargas de las aguas residuales del beneficio de café, para determinar su impacto en la calidad del agua del río Nopalutla, así como del agua del tanque de almacenamiento, del agua de lavado del café y de la descarga de agua del proceso, con el fin de determinar la variabilidad espacial y temporal de la calidad del agua en los diferentes puntos de muestreo seleccionados, tanto en la temporada previa y durante el procesamiento del grano de café.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción de la zona de estudio. Xicotepec se encuentra ubicado dentro de la Sierra Norte del estado de Puebla, entre los paralelos $20^{\circ}26'$

y $20^{\circ}13'$ latitud Norte y los meridianos $97^{\circ}45'$ y $98^{\circ}03'$ longitud Oeste. Los climas que predominan en el municipio son cálido húmedo, con lluvias todo el año Af (22,63 %), semicálido húmedo con lluvias todo el año ACf (77,09 %) y templado húmedo con lluvias todo el año C(f) (0,28 %) (INEGI, 1995). La población total del municipio para 2020 fue de 80.591 habitantes, de 57.072 personas en edad laboral el 14,60 % trabaja en actividades primarias, 16,9 % en actividades secundarias y 50,3 % en el sector terciario (INEGI, 2020). Xicotepec es el municipio de Puebla en donde más café se produce con 15.860 toneladas, seguido de Zihuateutla (12.320 ton), Hueytamalco (9.600 ton), Tlacuilotepec (8.960 ton), Jalpan (8.525 ton), Cuetzalan del Progreso (6.582 ton), Tlaxco (6.300 ton) y Jopala (6.000 ton) (SIAP, 2024).

Selección y descripción de sitios de muestreo. Para evaluar y comparar las características físicas, químicas y microbiológicas del agua antes y después del proceso del lavado de café y conocer la variabilidad espacial de la calidad del agua, se designaron seis puntos de muestreo (Figura 1). El primer sitio (S1) corresponde al arroyo aguas arriba, donde se bombea el agua hasta el beneficio de café; el tanque, que almacena el agua del arroyo y que será utilizada para el proceso de lavado del café representa al sitio 2 (S2); el sitio 3 (S3) corresponde a la zona del arroyo aguas abajo, posterior a la ubicación del beneficio de café.

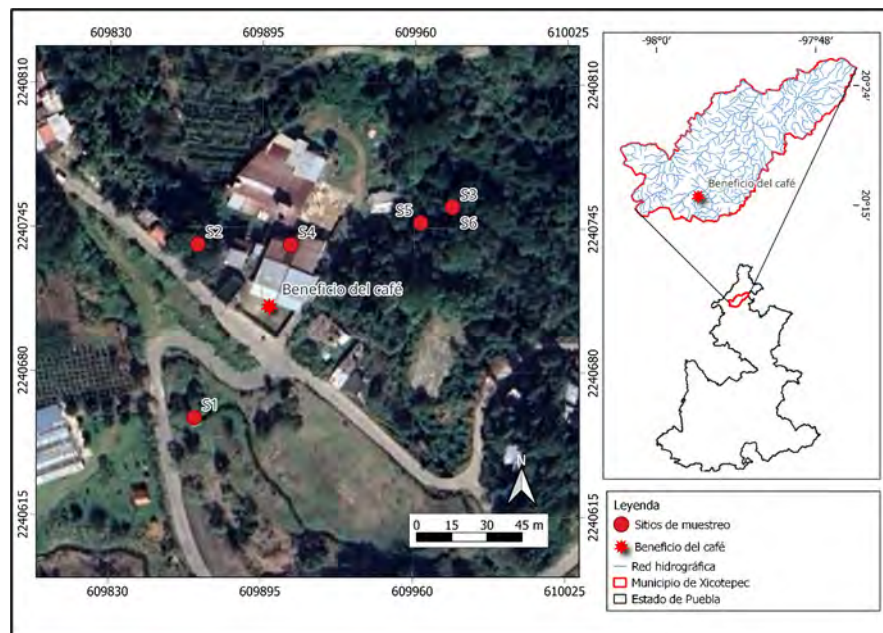


Figura 1. Sitios de muestreo del agua superficial fuera del beneficio de café (S1, S3 y S6) y del tanque de almacenamiento dentro del beneficio (S2), zona de lavado del café (S4) y descarga de aguas residuales (S5). Fuente: Google Earth. INEGI, 2023.

Una vez que el beneficio de café comenzó a operar se fijaron los otros tres puntos de muestreo, que corresponden al agua de lavado de café, cuando está siendo separada de los granos (S4), antes de ser descargada (S5) y, finalmente, cuando se descarga al arroyo Nopalutla (S6). Los puntos se presentan en la figura 2, que describe las etapas del proceso del beneficio húmedo de café. Es importante mencionar que el S3 y S6 son el mismo sitio, con la diferencia de que en S3 se muestreó en septiembre de 2019, antes de la temporada de cosecha y en S6 durante la temporada de procesamiento del café, en enero de 2020.

Caracterización fisicoquímica y microbiológica del agua. Las muestras de agua fueron obtenidas antes (septiembre de 2019 en los sitios 1, 2 y 3) y durante el periodo de actividad de procesamiento del café (enero de 2020 en los sitios 4, 5 y 6) y analizadas conforme lo establecen las normas oficiales mexicanas (NOM) vigentes. Se determinaron 17 parámetros fisicoquímicos y dos microbiológicos. La temperatura (T), pH y Conductividad eléctrica (CE) se determinaron por el método potenciométrico (Cotemarnat, 2014; 2016a; 2018), con un instrumento de campo Conductronic PC18;

los sólidos sedimentables (SS) con se determinaron, con cono Imhoff (Cotemarnat, 2013a); los sólidos suspendidos totales (SST) y sólidos disueltos totales (SDT), por gravimetría (Cotemarnat, 2016b); el color y la turbidez, se determinaron por fotometría, con un equipo Merck SQ118 (Cotemarnat, 2001a; 2001b); el olor se determinó de acuerdo con el proyecto de norma de Cotemarnat (2005); dureza, cloruros (Cl), acidez y alcalinidad, se determinaron por volumetría, como lo indican las normas de

Cotemarnat (2001c; 2001d; 2001e); las Grasas y Aceites (GA), se midieron por el método soxhlet (Cotemarnat, 2013b); la demanda química de oxígeno (DQO), nitrógeno (N) y fósforo (P) totales, se determinaron mediante espectrofotometría con pruebas de cubetas de la marca Merck, en un equipo Spectroquant NOVA60A (Cotemarnat, 2001f; 2010; 2011). Como indicadores biológicos de calidad del agua, se midieron los coliformes totales y coliformes fecales (Cotemarnat, 2015).

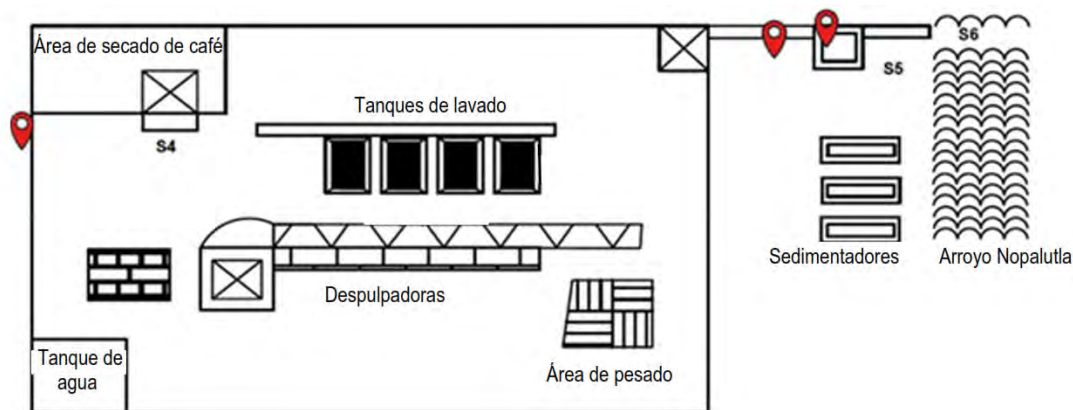


Figura 2. Descripción de las etapas del proceso del beneficio húmedo de café que descarga sus aguas residuales al arroyo Nopalutla y ubicación de los puntos de muestreo S4, S5 y S6.

Evaluación de la calidad del agua. Para determinar la calidad del agua se tomaron en cuenta las normas oficiales mexicanas de la Semarnat (2021), que establece los límites permisibles (LP) de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación (con valores instantáneos V.I. de descargas en ríos); la SSA1 (2021), que establece los límites permisibles de calidad del agua para uso y consumo humano y la Semarnat (1997), que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público. Respecto a los criterios de calidad del agua, se consideró, de acuerdo con lo que establece la Comisión Nacional del Agua (CNA), según los parámetros que monitorea la Red Nacional de Medición de la Calidad del Agua (Renameca) en 5.000 sitios del país, tanto para aguas superficiales como subterráneas (CONAGUA, 2020). También, se calculó la desviación estándar entre los seis sitios muestreados para cada parámetro, de manera que se pueda determinar aquellos que tienen grandes variaciones por la operación del procesamiento del café.

Análisis estadístico de los resultados. El análisis estadístico de los parámetros fisicoquímicos definidos se realizó mediante dos técnicas con el software Matlab. Primero, se determinó la intensidad y la dirección de la relación lineal entre las variables, es decir, entre los parámetros de calidad del agua medidos, mediante el análisis del coeficiente de correlación de Pearson.

Posteriormente, se analizó la variabilidad espacial y temporal de los parámetros de calidad del agua medidos en los distintos sitios; lo anterior se determinó mediante el análisis de grupos, en el cual, se clasifican los objetos de un sistema en categorías o grupos

basados en sus proximidades o similitudes. En este agrupamiento jerárquico se forman los grupos secuencialmente, empezando por la comparación de dos objetos con mayor similitud que formarán el grupo más alto y así sucesivamente. Se utilizó la distancia euclidiana entre los parámetros medidos en los distintos sitios y temporadas para representar los resultados de variabilidad, a través de un dendrograma (Singh *et al.* 2004; Liu *et al.* 2019).

En ambos casos, se analizaron, de manera independiente, los dos periodos de muestreo, es decir, antes del procesamiento del café (S1, S2 y S3) y durante la temporada de trabajo del beneficio de café (S4, S5 y S6).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Parámetros físicos. La tabla 1 muestra los valores de los parámetros físicos de las muestras de agua de los seis puntos de muestreo. Los parámetros de T, SS y SST se compararon con la norma de la Semarnat (2021) (V.I. Ríos), de los cuales, solo los SS fueron superiores al límite permisible (LP), que es de 2 mL/L. Los sitios que sobrepasaron el valor fueron los S4, S5 y S6, ya que son aguas residuales provenientes del lavado y despulpado del café y se descargan directamente al arroyo sin ningún tratamiento, por lo que contienen residuos sólidos de la pulpa del grano de café, siendo el valor más alto en el sitio S4, justo en la etapa de lavado del grano.

También, se compararon los parámetros físicos con la norma del SSA1 (2021), ya que el agua utilizada en el proceso debe ser considerada como potable para ser utilizada en un producto alimenticio. En este caso, se encuentran normados los SDT, color y

turbidez, de los cuales, solo los dos últimos sobrepasaron los LP, en los sitios S4, S5 y S6. Nuevamente, el sitio S4 se destacó por tener los valores más altos: color de 44,2 m⁻¹ y turbidez 299 UNT, lo cual, se presentó porque es la etapa del lavado donde se generan una gran cantidad de residuos sólidos y semi húmedos. Las muestras de los sitios S1, S2 y S3 presentaron color con valores muy bajos; sin embargo, al salir del proceso de lavado las muestras adquirieron tonalidades de color café, quedando los sitios S4 y S5 fuera del LP.

Es importante hacer la comparación de los valores de parámetros físicos de los sitios S3 y S6, ya que se aprecia claramente la influencia de las descargas de aguas residuales del beneficio de café en la calidad del agua del arroyo. Para el caso de los SS, pasó de 0,2 a 38,5 mL/L, SDT de 0,625 a 0,5165 mg/L, SST de 0,0299 a 0,0419 mg/L, color de 1,4 a 14,3 m⁻¹, turbidez de 6 a 85 UNT; en cuanto al olor, se percibió un olor dulce similar a la miel.

Parámetros químicos. La tabla 2 muestra los valores obtenidos para los diez parámetros químicos de las muestras de agua de los seis puntos de muestreo. Los parámetros que rebasaron los LP fueron la dureza, DQO y fosfatos (Semarnat, 2021) (V.I. Ríos). Los valores más altos de DQO para las aguas mieles se presentaron en los sitios de muestreo S4 y S5, con valores de 3.708 y 2.504 mg/L y no cumplen con el LP, que es de 210 mg/L. Para el sitio S6, el valor de DQO obtenido fue de 320 mg/L y muestra una disminución considerable respecto a los puntos S4 y S5; esto se podría deber a que, una vez que el agua residual entra en contacto con la del arroyo Nopalutla, comienza a diluirse. La estimación de la DQO es importante para plantear estrategias que disminuyan la carga de materia orgánica de las aguas mieles de lavado de café, de tal forma, que se reduzca el impacto ambiental en la calidad del agua del arroyo.

Tabla 1. Parámetros físicos determinados en las muestras de agua analizadas en los diferentes sitios del beneficio de café y del arroyo.

Sitio de muestreo	T (°C)	SS (mL/L)	SDT (mg/L)	SST (mg/L)	Color (m ⁻¹)	Turbidez (UNT)	Olor
S1	21,5	0,05	0,0497	0,0228	0,7	4	Dulce
S2	21,3	0	0,0807	0,0293	1,8	11	Dulce
S3	21,4	0,2	0,0625	0,0299	1,4	6	Dulce
S4	21,8	178,5	2,81	0,4	44,2	299	Dulce
S5	21,4	124,2	1.418	0,372	44,1	213	Dulce
S6	21,5	38,5	0,5165	0,0415	14,3	85	Dulce
Desviación estándar	0,17	76,60	1.1066	0,1836	21,1	125	
Límites permisibles (LP)							
NOM-001	35	2	N.A.	84	N.A.	N.A.	N.A.
NOM-127	N.A.	N.A.	1000	N.A.	15	4	Agradable

T: temperatura, SS: sólidos sedimentables, SDT: sólidos disueltos totales, SST: sólidos suspendidos totales. LP: límites permisibles, N.A.: no aplica.

Tabla 2. Parámetros químicos determinados en las muestras de agua analizadas en los diferentes sitios del beneficio de café y del arroyo.

Sitio de muestreo	pH	CE (µS/cm)	Cl ⁻ (mg/L)	Dureza (mg/L CaCO ₃)	Acidez (mg/L CaCO ₃)	Alcalinidad (mg/L CaCO ₃)	GA (mg/L)	DQO (mg/L)	N (mg/L)	P (mg/L)
S1	6,9	90,10	0,031	16,00	8	14	0,91	140	0,6	0,64
S2	7,75	103,40	0,030	29,00	5	19	0,16	189	2,1	0,38
S3	7,16	75,95	0,034	22,00	9	16	0,19	174	1,8	0,78
S4	7,18	2.169,40	0,084	1.215,50	550	155	0,54	3.708	18,6	45,60
S5	7,25	1.176,60	0,062	938,00	350	105	0,21	2.504	13,8	38,80
S6	6,47	315,32	0,027	437,50	60	55	0,52	320	6	11,20
Desviación estándar	0,42	853,17	0,023	523,98	232	58	0,29	1.547	7,4	20,64
Límites permisibles (LP)										
NOM-001	6,5-8,5	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	21	210	35	21
NOM-127	6,5-8,5	N.A.	250	500	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0,5	N.A.

CE: conductividad eléctrica, Cl⁻: cloruros, GA: grasas y aceites, DQO: demanda química de oxígeno, N: nitrógeno, P: fósforo, N.A.: no aplica.

Las muestras de agua de los puntos de muestreo S4 y S5 presentaron una mayor cantidad de fosfatos que los LP. Los fosfatos están relacionados con la composición de la pulpa de los granos de café y los fertilizantes utilizados para su cultivo. El contenido de fósforo en las aguas residuales del procesamiento húmedo de café varía entre 4 y 36 mg/L (Alemayehu *et al.* 2020); para este beneficio de café su concentración está por arriba de los valores típicos.

El pH, las grasas y aceites y el nitrógeno total no sobrepasaron los LP establecidos por la Semarnat (2021) (V.I. Ríos); sin embargo, al comparar con los LP de la SSA1 (2021) se observa que el nitrógeno sobrepasa los LP de 0,5 mg/L en todos los sitios de muestreo, con los valores más altos en los sitios S4 y S5; los valores de dureza para los sitios de muestreo S4 y S5 estuvieron fuera de los LP. La dureza está relacionada con la adición de cal para el lavado de los granos y cuyo exceso ocasiona un mal sabor en el agua e interfiere con otros usos que se le pudieran dar.

Los valores de pH obtenidos para las aguas mieles de lavado de café oscilaron entre 6,47 y 7,75, que están dentro de los LP; no presentan valores tan ácidos, debido a la adición de cal (óxido de

calcio) durante el proceso de lavado, que se utiliza para remover los restos de mucílago que quedan en los granos, una vez transcurrido el tiempo de fermentación. Siu *et al.* (2007) reportaron resultados similares; los valores típicos de pH oscilan entre 6 y 8, de acuerdo con la alcalinidad característica para las aguas de despulpe y lavado del café, dichas aguas tienen concentraciones entre 10 y 15 mg/L de CaCO_3 (Rodríguez Pérez *et al.* 2000), tal como se observa en los sitios S1, S2 y S3, aunque en este caso, no era temporada de procesamiento de café para tales sitios; sin embargo, los valores aumentan en 100 % cuando inicia el procesamiento del café en los sitios S4 y S5 y disminuye, considerablemente, al entrar al río y se diluyó hasta 55 mg/L, en el sitio S6.

Parámetros microbiológicos. La tabla 3 muestra los valores obtenidos para los análisis microbiológicos. Todos los sitios de muestreo presentaron valores de coliformes totales superiores a los LP, en donde el límite es de 2 NMP, para aguas que se consideran y se usan como potables (Semarnat, 2021). En este caso, el agua de entrada al proceso no recibió ningún tipo de tratamiento y se tomó directamente del arroyo.

Tabla 3. Parámetros microbiológicos determinados en las muestras de agua analizadas en los diferentes sitios del beneficio de café y del arroyo.

Sitio de muestreo	Coliformes totales (NMP/100 mL)	Coliformes fecales (NMP/100 mL)
S1	1.609	8
S2	551	3
S3	569	3,5
S4	2.400	916
S5	813	806
S6	2.400	1.614
Límites permisibles (LP)		
NOM-127	2	0
NOM-003		240 (con contacto directo), 1000 (con contacto indirecto)

NMP: número más probable, LP: límites permisibles.

Respecto al análisis de coliformes fecales, aunque las muestras S4 y S5 presentaron valores por debajo de los LP, el punto de muestreo correspondiente a S6 presentó un valor muy alto y superior al LMP de 1.000 NMP, que establece la Semarnat (1997). La presencia de coliformes fecales en la muestra de agua de S6 se asocia a las descargas de aguas residuales provenientes de la comunidad cercana a la ubicación del beneficio de café, por lo que estas aguas no deben de ser empleadas para otros usos. La presencia de coliformes en el agua, tanto de entrada al proceso como la que se descarga al arroyo después del lavado de café, indica que es necesario un tratamiento para eliminar estos microorganismos, especialmente, los coliformes fecales, que son patógenos causantes de enfermedades hídricas.

Correlación entre los parámetros fisicoquímicos. Los coeficientes de correlación de Pearson del análisis estadístico de los sitios S1, S2 y S3 arrojan correlación positiva alta $> 0,9$, de los parámetros SST, turbidez, color y pH con dureza, alcalinidad, DQO y N, por lo que

se asume que, aunque no hay procesamiento de café en la temporada en que se analizaron estos puntos, sí existe contaminación residual de los periodos de producción anteriores. En el caso de los sólidos, turbidez y color se debe a los residuos de la cáscara, mucílago y pulpa del café, mientras que la dureza y alcalinidad son resultado del uso de óxido de calcio durante el proceso de lavado del café. En cuanto a los elevados valores de DQO y N se pueden deber a la gran cantidad de materia orgánica que resulta del procesamiento de café y a los agroquímicos utilizados durante su cultivo. Es evidente el caso crítico de contaminación del río Nopalutla, una vez que inicia el procesamiento de café, ya que todos los parámetros fisicoquímicos incrementan simultáneamente con correlaciones positivas altas $> 0,7$; por lo anterior, es inminente la necesidad de aplicar algún tratamiento para las aguas residuales del beneficio.

Variabilidad espacial y temporal de la calidad del agua. El análisis de grupos permite presentar el dendrograma de la figura 3.

Particularmente, se observan cinco grupos; el primero, formado por los sitios S2 y S3, que corresponden al tanque de almacenamiento y aguas abajo del beneficio de café, en los cuales, existen similitudes en la calidad del agua, ya que no hay actividades de procesamiento

de café en el periodo de septiembre. A su vez, estos dos sitios forman un segundo grupo con el S3, que corresponde a aguas arriba; en este caso, ambos grupos no presentan variabilidad espacial significativa y se consideran como sitios con bajo nivel de contaminación.

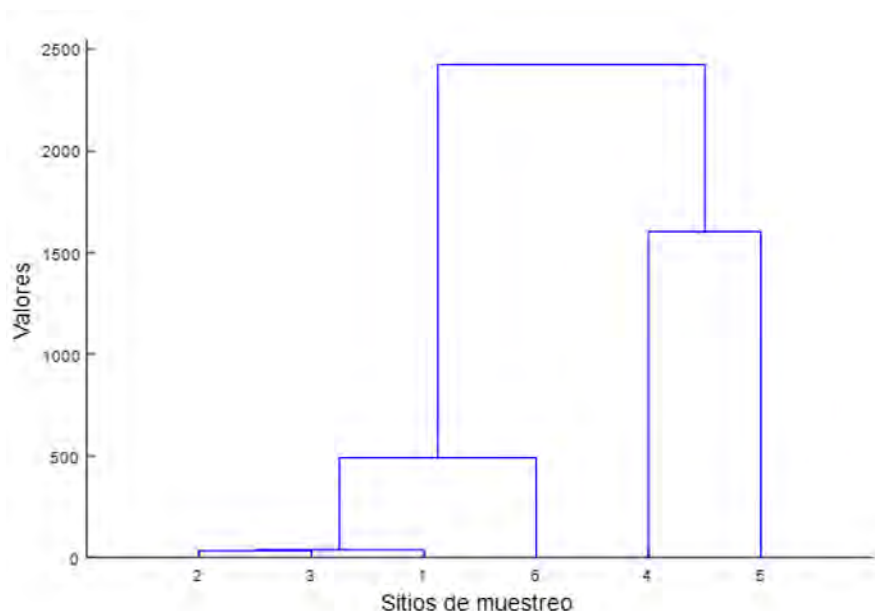


Figura 3. Dendrograma que presenta el agrupamiento de los sitios de muestreo por similitudes en las características fisicoquímicas de las muestras de agua analizadas en el beneficio de café y del arroyo.

El tercer grupo se forma por los dos anteriores y el sitio S6, que corresponde al mismo S3, pero en temporada de procesamiento de café, por lo que se observa una variabilidad temporal importante, evidenciando que las descargas de aguas residuales del beneficio de café se diluyen al incorporarse al arroyo, pero la carga de contaminantes es tan alta, que se aprecia gran diferencia con los valores de los grupos anteriores; por lo anterior, se considera como un sitio de contaminación media.

El cuarto grupo se forma por los sitios S4 y S5, que corresponden al agua de lavado y procesamiento del café y a la descarga de aguas residuales, respectivamente. La diferencia es amplia entre los valores de los dos primeros grupos e, incluso, con el tercero, por lo que se asume que hay una variabilidad espacial y temporal alta, considerando a estos sitios como los de mayor contaminación.

El último grupo se forma de la unión de los tres primeros con el cuarto. La variabilidad espacial y temporal de la contaminación del agua del arroyo Nopalutla quedan evidenciadas con esta herramienta de análisis.

La presencia de un alto contenido de sólidos en el agua de lavado se relaciona directamente con el color café, característico de las aguas mieles, ya que contienen azúcares, proteínas y compuestos fenólicos, provenientes del mucílago del café que, cuando se fermentan, producen un olor dulce a miel, cuando son recientes y un olor putrefacto.

La turbidez se ve afectada por la presencia de los sólidos en el agua y la importancia de su análisis se debe a la presencia de partículas coloidales en estas aguas, lo que vuelve más difícil la eliminación o inactivación de microorganismos patógenos. A su vez, tanto la turbidez como el color de las aguas residuales descargadas limitan los procesos fotosintéticos naturales (Ijanu *et al.* 2020). Particularmente, los sólidos sedimentables tienen un aumento de más del 100 % durante la temporada de actividades del beneficio de café, por lo que sería útil analizar la propuesta de un proceso de sedimentación previo a la descarga de las aguas mieles, ya que podrían remover alrededor del 95 % de estos sólidos (Gutiérrez Guzmán *et al.* 2014).

De acuerdo con los criterios de calidad del agua de México, DQO > 200 mg/L, indica que son aguas municipales con fuerte impacto de descargas de aguas residuales crudas y no municipales (CONAGUA, 2022). La presencia de grandes cantidades de materia orgánica genera una disminución de la cantidad de oxígeno disuelto por la alta demanda para la oxidación de los compuestos orgánicos. Lo anterior, lleva a que un cuerpo de agua cambie de condiciones aerobias a anaerobias, causantes de los malos olores (Ijanu *et al.* 2020).

La presencia de fosfatos a esta concentración junto con los altos niveles de DQO en los cuerpos de agua causan grandes problemas, debido a que eliminan el oxígeno disuelto, provocando la mortalidad de los peces, desequilibrios en la vida acuática y eutrofización del cuerpo de agua en donde se descargan (Beyene *et al.* 2012).

En este sentido, la literatura propone algunas alternativas para su disposición y aprovechamiento, como es la fertilización de los cultivos por la alta carga de nutrientes (nitrógeno y fósforo) y su fácil aplicación; sin embargo, se requiere un ajuste de pH por los bajos valores que presentan las descargas de aguas residuales del procesamiento del café (Cássia Campos *et al.* 2021).

La posibilidad del uso del agua residual para riego agrícola requiere el cumplimiento de límites establecidos por la Organización Mundial de la Salud; como lo establecen Getahun *et al.* (2024), es posible remover el color y la turbiedad, usando coagulantes naturales, como la moringa y el aloe vera, logrando eficiencias mayores al 90 %, para ambos parámetros.

Existen importantes estudios con relación al aprovechamiento de los residuos generados por el procesamiento del café (Bonilla-Hermosa *et al.* 2014), como en la reducción del agua utilizada y su tratamiento posterior, por procesos fisicoquímicos (Amarasinghe *et al.* 2015) y biológicos (Jenifer *et al.* 2020; Sujatha *et al.* 2020). Otra posibilidad de tratamiento a bajo costo es el propuesto por Hernández Martínez *et al.* (2021), en donde se utiliza un biofiltro formado con piedra pómez, biopelículas de formadas con la levadura *Saccharomyces cerevisiae* y una capa de biocarbón activado, logrando reducir 100 % de la carga orgánica.

Entre los tratamientos que se recomiendan en la literatura están los procesos de oxidación avanzada, coagulación y floculación, adsorción, humedales, oxidación aerobia y anaerobia (Alemayehu *et al.* 2020); sin embargo, cada método tiene sus limitaciones que deben ser tomadas en cuenta, para lograr la producción verde y sustentable de café (Rattan *et al.* 2015). Incluso, los residuos sólidos y semi sólidos del beneficio de café, como la cáscara y la pulpa, podrían ser aprovechados para producir extractos con actividad antifúngica (Alvarado-Ambriz *et al.* 2020). Los procesos biológicos son una importante opción para el tratamiento de las aguas residuales de este proceso, obteniéndose una relación de DBO₅/DQO por encima de 0,5, dando como resultado aguas biodegradables con tratamientos adecuados.

De acuerdo con los datos obtenidos se recomienda realizar un monitoreo continuo de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos e incluir aquellos con una ponderación alta, que permita medir el índice de calidad del agua (ICA), como lo establece la Comisión Nacional del Agua en México o con algún otro modelo, como el del NSF (García-González *et al.* 2021), de tal manera, que se tenga una interpretación clara y entendible para los productores de café y se concientice sobre la importante necesidad de realizar un tratamiento de las aguas residuales del beneficio húmedo del café, antes de descargarlo al río Nopalutla.

Como conclusión, se evidenció un impacto negativo de las aguas mieles provenientes del beneficio de café, debido a que modifican las características fisicoquímicas y la calidad del agua del arroyo Nopalutla, en donde son descargadas sin un tratamiento, impidiendo que el agua pueda ser aprovechada nuevamente. Las poblaciones que se ubican aguas abajo utilizan el agua del arroyo para sus

actividades básicas de aseo y consumo, por lo que la contaminación causada por las aguas mieles descargadas representan un riesgo a la salud de la población, por el contacto directo, principalmente, por la presencia de microorganismos patógenos.

Agradecimientos. Los autores agradecen con profundo respeto y admiración al Dr. Fernando Hernández Aldana q.e.p.d. **Conflictos de intereses:** El presente artículo es derivado del trabajo de grado para obtener el título de licenciatura en Ingeniería Ambiental, elaborado por Betzabe Hernández Lorenzo. El manuscrito fue preparado y revisado con la participación de todos los autores, quienes declaramos que no existe ningún conflicto de intereses que ponga en riesgo la validez de los resultados presentados. **Contribución de los autores:** Gabriela Pérez Osorio: conceptualización, investigación, supervisión, escritura-borrador original; Fabiola Avelino Flores: conceptualización, metodología, validación, análisis formal; Betzabe Hernández Lorenzo: metodología, investigación, curación de datos, escritura-borrador original; José Eligio Moisés Gutiérrez Arias: software, análisis formal, escritura-revisión y edición, visualización; José Carlos Mendoza Hernández: validación, análisis formal, escritura-revisión y edición; Yaselda Chavarín Pineda: redacción del borrador original, revisión y edición, visualización.

REFERENCIAS

- ALEMAYEHU, Y.A.; ASFAW, S.L.; TIRFIE, T.A. 2020. Management options for coffee processing wastewater. A review. In Journal of Material Cycles and Waste Management. 22(2):454-469. Springer. <https://doi.org/10.1007/s10163-019-00953-y>
- ALVARADO-AMBRIZ, S.; LOBATO-CALLEROS, C.; HERNÁNDEZ-RODRÍGUEZ, L.; VERNON-CARTER, E.J. 2020. Wet processing coffee waste as an alternative to produce extracts with antifungal activity: In vitro and in vivo valorization. Revista Mexicana de Ingeniería Química. 19:135-149. <https://doi.org/10.24275/rmiq/Bio1612>
- AMARASINGHE, U.A.; HOANH, C.T.; D'HAEZE, D.; HUNG, T.Q. 2015. Toward sustainable coffee production in Vietnam: More coffee with less water. Agricultural Systems. 136:96-105. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2015.02.008>
- BEYENE, A.; KASSAHUN, Y.; ADDIS, T.; ASSEFA, F.; AMSALU, A.; LEGESSE, W.; KLOOS, H.; TRIEST, L. 2012. The impact of traditional coffee processing on river water quality in Ethiopia and the urgency of adopting sound environmental practices. Environmental Monitoring and Assessment. 184(11):7053-7063. <https://doi.org/10.1007/s10661-011-2479-7>
- BONILLA-HERMOSA, V.A.; FERREIRADUARTE, W.; FREITAS SCHWAN, R. 2014. Utilization of coffee by-products obtained from semi-washed process for production of value-added compounds. Bioresource Technology. 166:142-150. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.05.031>

- CÁSSIA CAMPOS, R.C.; PINTO, V.R.A.; MELO, L.F.; ROCHA, S.J.S.S.; DA, COIMBRA, J.S. 2021. New sustainable perspectives for "Coffee Wastewater" and other by-products: A critical review. *Future Foods*. 4:100058. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2021.100058>
- CERVANTES, M.; VELÁZQUEZ, J.R. 2015. Estudio de cadenas de valor de café en el Municipio de Xicotepec de Juárez, Puebla. *Revista Administración & Finanzas*. 2(4):800-804.
- COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA, CONAGUA. 2022. Estadísticas del agua en México 2021. Disponible desde Internet en: <https://agua.org.mx/biblioteca/estadisticas-del-agua-en-mexico-2021-conagua/>
- COMITÉ CONSULTIVO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN DE REGULACIÓN Y FOMENTO SANITARIO - SSA1. 2021. NOM-127-SSA1-2021: Norma Oficial Mexicana que establece los criterios y métodos para evaluar la calidad del agua para uso y consumo humano. Disponible desde Internet en: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5650705&fecha=02/05/2022
- COMITÉ TÉCNICO DE NORMALIZACIÓN NACIONAL DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES, COTEMARNAT. 2001a. NMX-AA-045-SCFI-2001: Análisis de agua - Determinación de color platino-cobalto en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba (cancela a la NMX-AA-045-1981). Disponible desde Internet en: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166781/NMX-AA-045-SCFI-2001.pdf>
- COMITÉ TÉCNICO DE NORMALIZACIÓN NACIONAL DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES, COTEMARNAT. 2001b. NMX-AA-038-SCFI-2001: Análisis de agua - Determinación de turbiedad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba (cancela a la NMX-AA-038-1981). Disponible desde Internet en: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166777/NMX-AA-038-SCFI-2001.pdf>
- COMITÉ TÉCNICO DE NORMALIZACIÓN NACIONAL DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES, COTEMARNAT. 2001c. NMX-AA-072-SCFI-2001: Análisis de agua - Determinación de dureza total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba (cancela a la NMX-AA-072-1981). Disponible desde Internet en: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166788/NMX-AA-072-SCFI-2001.pdf>
- COMITÉ TÉCNICO DE NORMALIZACIÓN NACIONAL DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES, COTEMARNAT. 2001d. NMX-AA-036-SCFI-2001: Análisis de agua - Determinación de acidez y alcalinidad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba (cancela a la NMX-AA-036-1980). Disponible desde Internet en: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166776/NMX-AA-036-SCFI-2001.pdf>
- COMITÉ TÉCNICO DE NORMALIZACIÓN NACIONAL DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES, COTEMARNAT. 2001e. Análisis de agua - Determinación de cloruros totales en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba (cancela a la NMX-AA-073-1981). Disponible desde Internet en: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166789/NMX-AA-073-SCFI-2001.pdf>
- COMITÉ TÉCNICO DE NORMALIZACIÓN NACIONAL DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES, COTEMARNAT. 2001f. NMX-AA-029-SCFI-2001: Análisis de agua - Determinación de fósforo total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba (cancela a la NMX-AA-029-1981). Disponible desde Internet en: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166773/NMX-AA-029-SCFI-2001.pdf>
- COMITÉ TÉCNICO DE NORMALIZACIÓN NACIONAL DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES, COTEMARNAT. 2005. PROY-NMX-AA-083-SCFI-2005: Análisis de agua - Determinación de olor en aguas naturales y residuales - Método de prueba. Disponible desde Internet en: http://legismex.mty.itesm.mx/normas/aa/aa083-Proy2005_11.pdf
- COMITÉ TÉCNICO DE NORMALIZACIÓN NACIONAL DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES, COTEMARNAT. 2010. NMX-AA-026-SCFI-2010: Análisis de agua - Medición de nitrógeno total Kjeldahl en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba (cancela a la NMX-AA-026-SCFI-2001). <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166772/NMX-AA-026-SCFI-2010.pdf>
- COMITÉ TÉCNICO DE NORMALIZACIÓN NACIONAL DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES, COTEMARNAT. 2011. NMX-AA-030/2-SCFI-2011: Análisis de agua - Determinación de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba - Parte 2 - Método del tubo sellado a pequeña escala. Disponible desde Internet en: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166775/NMX-AA-030-2-SCFI-2011.pdf>
- COMITÉ TÉCNICO DE NORMALIZACIÓN NACIONAL DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES, COTEMARNAT. 2013a. NMX-AA-004-SCFI-2013: Análisis de agua - Medición de sólidos sedimentables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba (cancela a la NMX-AA-004-SCFI-2000). Disponible desde Internet en: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166763/NMX-AA-004-SCFI-2013.pdf>

- COMITÉ TÉCNICO DE NORMALIZACIÓN NACIONAL DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES, COTEMARNAT. 2013b. NMX-AA-005-SCFI-2013: Análisis de agua - Medición de grasas y aceites recuperables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba (cancela a la NMX-AA-005-SCFI-2000). Disponible desde Internet en: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166764/nmx-aa-005-scfi-2013.pdf>
- COMITÉ TÉCNICO DE NORMALIZACIÓN NACIONAL DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES, COTEMARNAT. 2014. NMX-AA-007-SCFI-2013: Análisis de agua - Medición de la temperatura en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba. Disponible desde Internet en: https://platiica.economia.gob.mx/normalizacion/wp-content/uploads/sites/2/PDF_Normas_Publicas/nmx-aa-007-scfi-2013.pdf
- COMITÉ TÉCNICO DE NORMALIZACIÓN NACIONAL DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES, COTEMARNAT. 2015. NMX-AA-042-SCFI-2015: Análisis de agua - Enumeración de organismos coliformes totales, organismos coliformes fecales (termotolerantes) y *escherichia coli* - Método del número más probable en tubos múltiples (cancela a la NMX-AA-42-1987). Disponible desde Internet en: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166147/nmx-aa-042-scfi-2015.pdf>
- COMITÉ TÉCNICO DE NORMALIZACIÓN NACIONAL DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES, COTEMARNAT. 2016a. NMX-AA-008-SCFI-2016: Análisis de agua - Medición de pH en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba (cancela a la NMX-AA-008SCFI-2011). Disponible desde Internet en: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166767/NMX-AA-008-SCFI-2016.pdf>
- COMITÉ TÉCNICO DE NORMALIZACIÓN NACIONAL DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES, COTEMARNAT. 2016b. NMX-AA-034-SCFI-2015: Análisis de agua - Medición de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba (cancela a la NMX-AA-034-SCFI-2001). Disponible desde Internet en: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166146/nmx-aa-034-scfi-2015.pdf>
- COMITÉ TÉCNICO DE NORMALIZACIÓN NACIONAL DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES, COTEMARNAT. 2018. NMX-AA-093-SCFI-2018: Análisis de agua - Medición de la conductividad eléctrica en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba (cancela a la NMX-AA-093-1984). Disponible desde Internet en: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166800/NMX-AA-093-SCFI-2000.pdf>
- CONAGUA. 2020. Calidad del Agua en México. Disponible desde Internet en: <https://www.gob.mx/conagua/articulos/calidad-del-agua>
- DADI, D.; MENGISTIE, E.; TEREFE, G.; GETAHUN, T.; HADDIS, A.; BIRKE, W.; BEYENE, A.; LUIS, P.; VAN DER BRUGGEN, B. 2018. Assessment of the effluent quality of wet coffee processing wastewater and its influence on downstream water quality. *Ecohydrology and Hydrobiology*. 18(2):201-211. <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2017.10.007>
- GARCÍA-GONZÁLEZ, J.; OSORIO-ORTEGA, M.A.; SAQUICELA-ROJAS, R. A.; CADME, M. L. 2021. Determinación del índice de calidad del agua en ríos de Santo Domingo de los Tsáchilas, Ecuador. *Ingeniería Del Agua*. 25(2):115. <https://doi.org/10.4995/ia.2021.13921>
- GETAHUN, M.; BEFEKADU, A.; ALEMAYEHU, E. 2024. Coagulation process for the removal of color and turbidity from wet coffee processing industry wastewater using bio-coagulant: Optimization through central composite design. *Heliyon*. 10:e27584. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27584>
- GUTIÉRREZ GUZMÁN, N.; VALENCIA GRANADA, E.; ARAGON CALDERON, R.A. 2014. Eficiencia de remoción en sistemas de tratamiento de aguas residuales del beneficio de café (*Coffea arabica*). *Colombia Forestal*. 17(2):151-159. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2014.2.a02>
- HERNÁNDEZ MARTÍNEZ, I.; SANTIAGO SEGURA, C.A.; LIMÓN HERNÁNDEZ, R.A.; LÓPEZ HERNÁNDEZ, V.; AGUILAR AGUILAR, F.A. 2021. Tratamiento de agua residual de beneficio de café mediante un biofiltro de bajo costo. *Revista Ingeniantes*. 8(1):60-66.
- HERRERA PINILLA, J.C.; CORTINA GUERRERO, H.A. 2013. Taxonomía y clasificación del café. *Manual Del Cafetero Colombiano*. 1:117-121. https://doi.org/10.38141/cenbook-0026_07
- IJANU, E.M.; KAMARUDDIN, M.A.; NORASHIDDIN, F.A. 2020. Coffee processing wastewater treatment: a critical review on current treatment technologies with a proposed alternative. In *Applied Water Science*. 10:11. <https://doi.org/10.1007/s13201-019-1091-9>
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y GEOGRAFÍA, INEGI. 1995. Xicotepec, Estado de Puebla: cuaderno estadístico municipal. 1994. Gobierno del estado de Puebla. Disponible desde Internet en: https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/integracion/municipios/cuad_est/1995/pue/xic/702825923754_1.pdf

- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y GEOGRAFÍA, INEGI. 2020. Principales resultados censo de población y vivienda, Puebla. Disponible desde Internet en: https://en.www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825198275.pdf
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y GEOGRAFÍA, INEGI. 2023. Marco geoestadístico, diciembre 2023. Disponible desde Internet en: <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=794551067314>
- JENIFER, A.A.; CHANDRAN, T.; MUTHUNARAYANAN, V.; RAVINDRAN, B.; NGUYEN, V.K.; NGUYEN, X.C.; BUI, X.T.; NGO, H.H.; NGUYEN, X.H.; CHANG, S.W.; NGUYEN, D.D. 2020. Evaluation of efficacy of indigenous acidophile- bacterial consortia for removal of pollutants from coffee cherry pulping wastewater. *Bioresource Technology Reports*. 11:100533. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2020.100533>
- LIU, C.; QIAN, B.; WANG, L.; MIAO, Q. 2019. Research on spatial-temporal distribution characteristics of main pollutants of the rivers in the Linyi development zone. *Journal of Water and Climate Change*. 10(2):285-297. <https://doi.org/10.2166/wcc.2018.187>
- NAVAZ, M.; ROY, E. 2016. Tecnologías apropiadas para la caficultura: aprovechamiento y tratamiento de residuos del café. *Engyneria Sense Fronteras*. 37p.
- OROZCO, C.; BARRIENTOS, H.; LOPEZLENA, A.; CRUZ, J.; SELVAS, C.; OSORIO, E.L.; OSORIO, E.D.; OSORIO, E.; OSORIO, E.; CHÁVEZ, R.; MIRANDA, J.; ARELLANO, J.; GIESSEMAN, B. 2005. Evaluación de una planta piloto de tratamiento de aguas residuales del procesamiento del café: características químicas. *Higiene y Sanidad Ambiental*. 5:123-131.
- RATTAN, S.; PARANDE, A.K.; NAGARAJU, V.D.; GHIWARI, G.K. 2015. A comprehensive review on utilization of wastewater from coffee processing. *Environmental Science and Pollution Research*. 22(9):6461-6472. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4079-5>
- RODRÍGUEZ PÉREZ, S.; PÉREZ SILVA, R.M.; FERNÁNDEZ BOIZÁN, M. 2000. Estudio de la biodegradabilidad anaerobia de las aguas residuales del beneficio húmedo del café. *Interciencia*. 25(8):386-390.
- RUELAS MONJARDÍN, L.C.; ARIAS MOTA, R.M.; RODRÍGUEZ RAMOS, LI. 2020. Impacto de la cafecultura en la contaminación del agua. En: Ortega Pineda, G.; Fabre Platas, D.A.; Cano Polo, Y.I. *Dialogando lo Ambiental. Compartiendo experiencias e intercambiando saberes*. Sedema, FAV. p.290-306.
- SECRETARÍA DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL, SADR. 2020. Café, la bebida que despierta a México. Disponible desde Internet en: <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/cafe-la-bebida-que-despierta-a-mexico?idiom=es>
- SECRETARIA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES, SEMARNAT. 1997. NOM-003-SEMARNAT-1997: Norma Oficial Mexicana que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público. Disponible desde Internet en: <https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/3297/1/nom-003-semarnat-1997.pdf>
- SECRETARIA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES, SEMARNAT. 2021. NOM-001-SEMARNAT-2021: Norma oficial mexicana que establece los límites permisibles (LP) de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación. Disponible desde Internet en: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022
- SERVICIO DE INFORMACIÓN ALIMENTARIA Y PESQUERA, SIAP. 2024. Servicio de Información Alimentaria y Pesquera, Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural.
- SINGH, K.P.; MALIK, A.; MOHAN, D.; SINHA, S. 2004. Multivariate statistical techniques for the evaluation of spatial and temporal variations in water quality of Gomti River (India) - A case study. *Water Research*. 38(18):3980-3992. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2004.06.011>
- SIU, Y.; MEJIA, G.; MEJIA-SAAVEDRA, J.; POHLAN, J.; SOKOLOV, M. 2007. Heavy metals in wet method coffee processing wastewater in Soconusco, Chiapas, Mexico. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 78(5):400-404. <https://doi.org/10.1007/s00128-007-9094-x>
- SUJATHA, G.; SHANTHAKUMAR, S.; CHIAMPO, F. 2020. UV light-irradiated photocatalytic degradation of coffee processing wastewater using TiO₂ as a catalyst. *Environments – MDPI*. 7(6):1-13. <https://doi.org/10.3390/environments7060047>



Análisis de la producción, características demográficas y socioeconómicas de los productores y campesinos en la zona rural de Medellín

Analysis of production, demographic and socioeconomic characteristics of producers and farmers in the rural area of Medellín

Dennys Herrera-Ramírez^{1,2} ; Lina Buelvas-Gutierrez³ ; Efrain Boom-Cárcomo^{3,4*}

¹Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Medellín - Antioquia, Colombia; e-mail: decahera@gmail.com

²Fundación Universitaria del Área Andina, Valledupar - Cesar, Colombia

³Universidad Popular del Cesar. Valledupar - Cesar, Colombia; e-mail: linamarbg@gmail.com

⁴Universidad de La Guajira. Riohacha - La Guajira, Colombia; e-mail: ingenieroboomb@gmail.com

*autor de correspondencia: ingenieroboomb@gmail.com

Cómo citar: Herrera-Ramírez, D.; Buelvas-Gutierrez, L.; Boom-Cárcomo, E. 2025. Análisis de la producción, características demográficas y socioeconómicas de los productores y campesinos en la zona rural de Medellín. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 28(1):e2418. <http://doi.org/10.31910/rudca.v28.n1.2025.2418>

Artículo de acceso abierto publicado por Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, bajo una Licencia Creative Commons CC BY-NC 4.0

Publicación oficial de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Institución de Educación Superior Acreditada en Alta Calidad por el Ministerio de Educación Nacional

Recibido: mayo 5 de 2023

Aceptado: mayo 3 de 2025

Editado por: Helber Adrián Arévalo Maldonado

RESUMEN

El estudio analiza la producción agrícola y las condiciones socioeconómicas de los pequeños agricultores en la zona rural de Medellín, Colombia. Identifica problemas, como la falta de prácticas de conservación de suelos, la escasez de financiamiento externo y la incertidumbre sobre la continuidad de cultivos tradicionales, debido a la globalización y el cambio climático. El estudio es relevante al destacar la necesidad de promover la sostenibilidad agrícola y mejorar la resiliencia de los agricultores, mediante prácticas climáticas inteligentes. Se empleó una metodología mixta, combinando encuestas con preguntas abiertas y cerradas, aplicadas a 1.480 agricultores, en cinco corregimientos. Los resultados muestran que la mayoría de los agricultores dependen de su propio capital y carecen de acceso a tecnologías sostenibles. Se proponen estrategias, como la agroforestería, la siembra directa y la recolección de aguas pluviales, para mejorar la producción y la seguridad alimentaria.

Palabras clave: Acciones de adaptación; Cambio climático; Prácticas agroecológicas tradicionales; Producción agrícola; Seguridad alimentaria.

ABSTRACT

The study analyzes agricultural production and the socioeconomic conditions of small farmers in the rural area of Medellín, Colombia. It identifies issues such as the lack of soil conservation practices, limited access to external financing, and uncertainty about the continuity of traditional crops due to globalization and climate change. The study is relevant as it highlights the need to promote agricultural sustainability and enhance farmers' resilience through climate-smart practices. A mixed methodology was used, combining surveys with open and closed-ended questions applied to 1,480 farmers across five townships. The results show that most farmers rely on their own capital and lack access to sustainable technologies. Strategies such as agroforestry, direct seeding, and rainwater harvesting are proposed to improve production and food security.

Keywords: Adaptation actions; Agricultural production; Climate change; Food security; Traditional agroecological practices.

INTRODUCCIÓN

La agricultura climáticamente inteligente, que incluye prácticas, como la agricultura de conservación, los servicios de información climática, las prácticas agroforestales y el control de la erosión, se ha integrado en las técnicas agrícolas convencionales, para contrarrestar los impactos adversos del cambio climático y promover la conservación (Antwi-Agyei *et al.* 2015); sin embargo, la transformación hacia sistemas agrícolas sostenibles es un proceso complejo que requiere la interacción dinámica entre la agricultura, la economía, la sociedad y el medio ambiente (Sanhueza-Aros & Peña-Cortés, 2020). En Colombia, la falta de políticas públicas que promuevan la agricultura campesina y la agroecología limitan el impulso de estos sectores. En lugar de ello, el gobierno sigue un modelo de desarrollo rural basado en los estándares de la “revolución verde”, que implica un uso intensivo de la tierra, el agua y los agroquímicos (Cabrera & Ramírez, 2014; Altieri, 2018).

Los problemas agroambientales recientes han llamado la atención de organizaciones internacionales, como la FAO, el IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático), la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura y la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Estas entidades destacan que es importante diseñar un enfoque proactivo, participativo y efectivo, para que brinden servicios ecosistémicos esenciales, a través de la agricultura verde, se adapten al cambio climático y contribuyan al logro de los ODS: 2 ‘Hambre cero’, 10 ‘Reducir las desigualdades’ y 13 ‘Acción climática’ (IPCC, 2014; Yeleliere *et al.* 2022).

El uso de prácticas agroecológicas y de producción limpia son conocidas, mundialmente, como una estrategia para transformar y proteger el sector agrícola, mejorar la seguridad alimentaria y contrarrestar el cambio climático (Chandra *et al.* 2018; FAO, 2018). Pörtner *et al.* (2021) resaltan que la adaptación agrícola frente al cambio climático y las emisiones de gases de efecto invernadero se

deben enfrentar para reducir las afectaciones en el clima. Aunque se han implementado acciones para abordar estos desafíos (Montoya-Rojas & Rivera-Marroquín, 2021), hay una falta de atención sobre los efectos de estas prácticas en las condiciones medioambientales y socioeconómicas (Ramírez-Santos *et al.* 2023).

Esta investigación tuvo como objetivo analizar la producción, las características demográficas y socioeconómicas de los productores y familias campesinas en la zona rural de Medellín, Colombia, utilizando datos del censo catastral de la agricultura familiar campesina. Se propusieron prácticas climáticas inteligentes y adaptativas para la sostenibilidad agrícola, basadas en las necesidades y las preocupaciones de los participantes.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación combina enfoques cualitativos y cuantitativos y se dividió en cuatro fases. En la primera, se realizó una revisión de fuentes secundarias para delimitar y formular el estudio. La segunda fase involucró la caracterización de familias residentes en los corregimientos de Medellín, mediante un muestreo territorial. En la tercera, se procesó y analizó detalladamente la información recopilada y en la cuarta, se identificaron los principales desafíos de los pequeños agricultores y se propusieron prácticas climáticas inteligentes y adaptativas para asegurar la sostenibilidad agrícola en la zona rural de Medellín.

Área de estudio. Se realizó en los corregimientos San Sebastián de Palmitas, San Cristóbal, Altavista, San Antonio de Prado y Santa Elena de la ciudad de Medellín (Figura 1), que representan, aproximadamente, el 71 % del territorio municipal. En la zona rural de Medellín, la mayoría de las propiedades son pequeñas, con áreas que no superan las tres hectáreas, lo que limita la producción agropecuaria a pequeñas áreas, en casi todas las 52 veredas. La tabla 1 muestra la información principal de los corregimientos estudiados.



Figura 1. Mapa del municipio de Medellín y corregimientos donde se realizó el estudio.

Tabla 1. Ubicación, área y división administrativa de los corregimientos del municipio de Medellín donde se realizó el estudio.

Corregimiento	Ubicación	m s.n.m.	Área	División administrativa
San Sebastián de Palmitas	Noroccidente	1.400 - 3.100	57,54 km ² (5.754 ha)	Una cabecera urbana y ocho veredas
San Cristóbal	Noroccidente	1.700 - 3.100	49,54 km ² (4.954 ha)	Una cabecera urbana y diecisiete veredas
San Antonio de Prado	Extremo suroccidental	1.800 – 3.000	60,4 km ² (6.040 ha)	Una cabecera urbana y ocho veredas
Altavista	Suroccidente	1.600 - 2.400	27,41 km ² (2.741 ha)	Una cabecera urbana y ocho veredas
Santa Elena	Oriente	2.650	70,46 km ² (7.046 ha)	Una cabecera urbana y catorce veredas

Recopilación de datos y métodos de muestreo. Se realizó un proceso de recopilación, revisión y análisis de fuentes secundarias, para consolidar información sobre la ruralidad en Medellín, Colombia. Se examinaron documentos de investigación científica, como caracterizaciones socioeconómicas y censos productivos, además de información del Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas (DANE, 2019).

Prueba Piloto. Para el piloto, se abordó una muestra del 3 % de los predios propuestos en la caracterización. La selección de los 84 predios participantes se hizo mediante un muestreo aleatorio

estratificado sin reemplazo. La estratificación de la muestra se efectuó según la distribución geográfica de los predios dentro del área de estudio, para garantizar una representación equitativa de las diferentes veredas existentes en la base de datos. Se dividió la población en subgrupos homogéneos (estratos), según su ubicación territorial. Finalmente, se seleccionó al azar un número proporcional de predios dentro de cada vereda, para asegurar que la muestra representara la diversidad del territorio y maximizara la representatividad de los resultados. La muestra estratificada por veredas se detalla en la tabla 2.

Tabla 2. Estratificación por veredas de la muestra seleccionada para el estudio.

Corregimiento	n	(%)
San Cristóbal	34	40,48 %
San Sebastián de Palmitas	20	23,81 %
Santa Elena	18	21,43 %
San Antonio de Prado	7	8,33 %
AltaVista	5	5,95 %
Total	84	100 %

Selección de la muestra. Los participantes se seleccionaron de los 2.213 productores inscritos en el Servicio Público de Extensión Agropecuaria (EPSEA) del Distrito de Medellín, según datos proporcionados por la Subsecretaría de Desarrollo Rural de la Alcaldía de Medellín. Se emplearon tabulaciones cruzadas y la fórmula de Yamane (1967), para estimar el tamaño de la muestra (Ecuación 1).

$$n = \frac{N}{1+N(e)^2}$$

n: Tamaño de las muestras

N: Tamaño de la población / universo

e: Posible error

Ecuación 1

Se realizó una encuesta, con un nivel de confianza del 95 % y un margen de error del 1,8 %; sin embargo, se optó por entrevistar a 1.480 personas (un poco más del tamaño de muestra mínimo).

Aplicación de la encuesta. Se diseñó y aplicó un cuestionario para recolectar datos primarios de hogares agrícolas en los cinco corregimientos de Medellín, objetos de estudio. El cuestionario, que incluía preguntas cerradas y abiertas, fue adaptado en Survey 123, una solución tecnológica en línea desarrollada por ESRI (Environmental Systems Research Institute), una empresa experta en sistemas de información geográfica. Se abordaron aspectos demográficos, conocimiento sobre prácticas agroecológicas, fuentes de financiamiento y desafíos de los pequeños agricultores en estos corregimientos. La población fue estratificada por ubicación geográfica (veredas o corregimientos) y tipo de producción agrícola (cultivos de ciclo corto, perennes, ganadería o mixtos). También, se clasificó según el tamaño del predio (pequeño, mediano, grande) y la experiencia agrícola.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características demográficas. De los 1.480 encuestados, el 72,5 % son hombres y el 27,5 % mujeres. La edad promedio fue de 45 años y, en términos de experiencia agrícola, el 82,7 % de los encuestados ha cultivado durante más de 15 años. En la zona, el cultivo de café abarca la mayor extensión de tierra, con 86,46 hectáreas, seguido de la producción de leche, con 72,80 hectáreas. La cebolla de rama y el plátano ocupan áreas significativas de 50,29 y 45,08 hectáreas, respectivamente. Asimismo, las áreas destinadas al pastoreo para la producción de carne de res abarcan 30,57 hectáreas, mientras que el cultivo de limón y flores ocupa 30,49 y 23,20 hectáreas, respectivamente. Otros cultivos, como el banano, el cilantro y el aguacate, también están presentes, con áreas

aprovechadas de 18,65, 17,31 y 15,03 hectáreas, respectivamente. En total, se utilizan 389,89 hectáreas de tierra para estos cultivos en la región rural.

Se evidenció cómo los agricultores colaboran entre sí y dentro de sus familias, a través del intercambio de conocimientos, mano de obra y bienes. Además, la producción de cultivos para el autoconsumo persiste, incluso, en fincas con enfoque comercial, lo que refleja una estrategia para garantizar la seguridad alimentaria familiar. Estos resultados coinciden con los estudios de Castro & Sen (2022), en Ghana y por Ruba *et al.* (2024), en China, donde se enfatiza que la tierra se considera una fuente de identidad social y cultural que se debe preservar y conservar, tanto para las generaciones presentes como para las futuras. Este enfoque, posteriormente, ayuda a reducir la inseguridad alimentaria y la pobreza (Tadesse & Ahmed, 2023; Erekaló *et al.* 2024).

Conocimientos y prácticas agroecológicas tradicionales utilizados como acciones de adaptación por los pequeños agricultores. La tabla 3 presenta las principales preguntas dirigidas a los 1.480 encuestados sobre su producción agropecuaria, prácticas de conservación de suelos y producción sostenible. Se observó que el 9,9 % de los encuestados utilizan productos químicos para fertilización y manejo de plagas, mientras que el 23 % optan por una producción orgánica, mediante biopreparados y compostaje; la mayoría, un 67,1 %, combinan ambas prácticas. Este último método refleja una integración entre prácticas agroecológicas y agricultura convencional, mostrando una sinergia entre el conocimiento tradicional y científico. Estudios sobre este tipo de prácticas demuestran que los agricultores acceden fácilmente a las prácticas y sistemas de conocimientos convencionales, ya que los consideran confiables y porque entienden su aplicación (Wood *et al.* 2014; Nyasimi *et al.* 2017; File & Nhamo, 2023).

Tabla 3. Principales preguntas dirigidas a los encuestados sobre su producción agropecuaria, prácticas de conservación de suelos y producción sostenible.

Pregunta	Respuesta	%
¿Para la producción agropecuaria, usted hace uso de?	Productos químicos	9,9
	Productos orgánicos	23,0
	Ambos	67,1
	Sin respuesta	0,1
¿Realiza prácticas de conservación y recuperación de suelos en su parcela?	No	60,0
	Sí	40,0
En su parcela, ¿aplica prácticas de producción sostenible?	No	53,31
	Sí	46,7

Más de la mitad de los encuestados no aplican prácticas de conservación y recuperación de suelos, lo que sugiere una falta de capacitación y concientización sobre la importancia del suelo en la producción agrícola. Esta situación se ve agravada por la ausencia de referencias explícitas a la agroecología, como ciencia o práctica, ya que, según Wezel *et al.* (2020), el término se suele asociar más con aspectos ecológicos que con estrategias agrícolas concretas.

Alrededor del 53 % de los encuestados no aplican prácticas de producción sostenible, debido a la falta de conciencia sobre su importancia, la limitada disponibilidad de recursos, como herramientas o asesoramiento técnico y los costos potencialmente más altos, en comparación con los métodos convencionales. Entre las prácticas sostenibles que no se implementan con regularidad se encuentran la rotación de cultivos, el uso de abonos orgánicos,

la agroforestería, el control biológico de plagas, la captación y aprovechamiento de agua lluvia y el manejo eficiente de residuos agrícolas. Aunque se han logrado avances en ciertas estrategias de conservación, el desarrollo generalizado de la agricultura sostenible en la zona sigue siendo desigual (FAO, 2018).

Fuente de financiación para la producción agrícola. En la tabla 4, con la pregunta la forma en que se adquirió el terreno

para la producción agrícola se destaca que la respuesta “No sabe/ No responde” es predominante, posiblemente, a la larga historia de conflictos armados y problemáticas sociales en Colombia, en las últimas décadas; también, se puede atribuir al hecho de que muchos encuestados son administradores y no propietarios de las fincas rurales. Además, se observa que una minoría, equivalente al 1,1 %, está en una situación de hecho, lo que sugiere el abandono de dichas propiedades.

Tabla 4. Forma de adquisición de la parcela por parte de los campesinos.

Forma de adquisición parcela	%
Compra con escritura registrada	27,2
Sucesión líquida (herencia legalizada)	24,3
Sucesión ilíquida (herencia no legalizada)	10,7
Compra con compraventa /Escritura simple/En proindiviso	7,0
Ocupación de hecho	1,1
Donación	0,3
Otro	0,1
No sabe/No responde	29,3
Total	100,0

En la tabla 5, se detallan las fuentes de financiación utilizadas por los agricultores encuestados para la producción de tierras e, igualmente, se destaca que el capital propio es la principal fuente de financiación para la cosecha de cultivos, probablemente, a la consolidación de las tierras y su reputación en el mercado mayorista y de distribución agrícola. Además, los subsidios y auxilios son escasos como fuente de financiación. La financiación, a través del Banco Agrario, representa un porcentaje bajo, principalmente, debido a la inestabilidad de los ingresos, altos intereses y baja productividad. Algunos agricultores enfrentan deudas que representan hasta la mitad de sus ingresos, mientras que otros no tienen deudas, debido a la falta de historial crediticio.

Desafíos a los que se enfrentan los pequeños agricultores. Aunque es fundamental en el movimiento agroecológico, la colaboración con los agricultores para crear y difundir conocimientos no es muy tomada en cuenta en las prácticas de investigación y divulgación (Agudelo Patiño, 2012; García López *et al.* 2019). Los principales desafíos que enfrentan los pequeños agricultores al implementar prácticas climáticas inteligentes y adaptativas en la zona rural de Medellín en Colombia, incluyen:

Falta de autonomía para vender sus productos a un precio justo. Uno de los principales desafíos de los sistemas de producción actuales es la concentración de la producción, a gran escala, en unas pocas empresas medianas y grandes, las cuales, controlan los precios de los cultivos tradicionales. Este tema fue ampliamente discutido por los entrevistados, resaltando que, históricamente, los cultivos a pequeña escala han sido marginados del mercado, debido a políticas de modernización y regulaciones de salud pública, que han afectado a los procesadores tradicionales (Pardo-Locarno *et al.* 2005).

Inseguridad de que los cultivos tradicionales continúen en el futuro. El cambio y la variabilidad climática representan una preocupación primordial para los agricultores, especialmente, por el impacto en los cultivos. Eventos extremos, como sequías, inundaciones y heladas pueden afectar negativamente la calidad y cantidad de los cultivos (Nyasimi *et al.* 2017). Las fluctuaciones en las temperaturas y las precipitaciones pueden alterar los ciclos de crecimiento y desarrollo de los cultivos, disminuir los rendimientos y comprometer la calidad de los productos agrícolas. Estos cambios pueden tener repercusiones económicas y sociales significativas para los agricultores, quienes dependen de los cultivos tradicionales para su sustento y para abastecer de alimentos a la comunidad.

La competencia de los cultivos comerciales y la globalización. La presión de la producción agrícola a gran escala y el aumento del comercio internacional pueden impulsar a los agricultores a abandonar sus prácticas tradicionales, en favor de variedades y técnicas más comerciales. Esta transición gradual puede resultar en la desaparición de los cultivos tradicionales y la pérdida de agrobiodiversidad y diversidad cultural (File & Nhamo, 2023). A su vez, la falta de inversión en investigación y desarrollo de prácticas agrícolas sostenibles, junto con la escasez de incentivos para cultivar variedades tradicionales, desmotiva a los agricultores a mantener sus prácticas ancestrales, lo que puede ocasionar la pérdida de recursos genéticos valiosos y de conocimientos transmitidos de generación en generación, por las comunidades agrícolas locales.

Tabla 5. Fuentes de financiación utilizadas por los agricultores para la producción de tierras.

Fuente de financiación	% de productores
Capital propio	83,8
Capital propio, Banco Agrario	5,07
Capital propio, Otros Bancos	2,23
Banco Agrario	1,76
Capital propio, Cooperativas	1,49
Otros Bancos	1,49
Cooperativas	0,74
No responde	0,54
Capital propio, subsidios, auxilios	0,41
Capital propio, Banco Agrario, Cooperativas	0,41
Capital propio, Comerciantes/intermediarios	0,34
Capital propio, Paga diarios (Gota gota)	0,34
Capital propio, Almacén de insumos	0,27
Comerciantes/intermediarios	0,27
Banco Agrario, Subsidios, auxilios	0,14
Subsidios, auxilios	0,14
Capital propio, Banco Agrario, Otros Bancos	0,14
Otros Bancos, Cooperativas	0,07
Capital propio, Banco Agrario, Subsidios, auxilios	0,07
Banco Agrario, Comerciantes/intermediarios	0,07
Capital propio, Banco Agrario, Otros Bancos, Cooperativas	0,07
Banco Agrario, Cooperativas	0,07
Capital propio, Banco Agrario, Subsidios, auxilios, almacén de insumos	0,07
Paga diarios (Gota gota)	0,07
Total	100,00

Regulaciones legales que limitan severamente el uso de las áreas boscosas. La expansión de las áreas de cultivo y la producción agrícola se puede ver limitada por las áreas de protección permanente, al limitar el acceso a tierras fértiles y ricas en nutrientes. Los agricultores enfrentan tasas de uso del suelo más elevadas para acceder a áreas permitidas, lo que impacta negativamente en su rentabilidad. Las regulaciones legales restringen los recursos naturales, afectando el rendimiento y la calidad de los cultivos y disminuyendo la competitividad de los agricultores en el mercado.

Se necesitan sistemas productivos innovadores que restauren ecosistemas resilientes y generen ingresos para los agricultores; por ejemplo, la Fundación, en Argentina, se ha desarrollado el programa “Paisaje Productivo Protegido”, que colabora con empresas agroindustriales para gestionar y proteger áreas silvestres dentro de territorios productivos, demostrando que la producción rentable puede ser sustentable y beneficiar al ecosistema (Proyungas, 2025).

Falta de reconocimiento por parte de la industria, de la calidad diferencial de sus productos. Aunque algunos agricultores se

involucran en sistemas de certificación agroecológica, obtener la certificación suele resultar costosa y con beneficios limitados para el agricultor. Las industrias que procesan los cultivos certificados, a menudo, pagan primas mínimas por estos productos. Además, programas, como el comercio justo, requieren la colaboración de la industria que, históricamente, muestra una participación mínima y desconfianza hacia los agricultores.

Propuesta de prácticas climáticas inteligentes y adaptativas para la sostenibilidad de la producción agrícola en la zona rural de Medellín. La agricultura representa una fuente crucial de ingresos para las familias en la zona rural de Medellín y los impactos del cambio climático están afectando significativamente su producción. Un desafío importante en Colombia es la falta de reconocimiento y valoración de las tradiciones productivas y culturales, lo que limita el desarrollo de prácticas sostenibles y agroecológicas (Manzur-Toledo & Barrera-Bassols, 2009).

Los agricultores de esta zona, por lo general, se dedican a la producción clásica de la economía campesina antioqueña, básicamente, al cultivo del café; sin embargo, en muchas veredas, se puede observar la

introducción de nuevos cultivos, como el helecho cuero y el tomate larga vida bajo invernadero, lo que sugiere que el campesino se adapta a nuevos productos, con miras a mejorar sus ingresos (Moisá & Hernández, 2010). El diagnóstico en la zona rural de Medellín destaca la necesidad de identificar y promover prácticas climáticas inteligentes y adaptativas para abordar los desafíos agrícolas. Se proponen las siguientes estrategias para la sostenibilidad de la producción agrícola en la región:

Agricultura de conservación: Mantener el suelo cubierto con residuos orgánicos, reducir la labranza y rotar cultivos, disminuye la erosión y mejora la fertilidad y capacidad de retención de agua del suelo. Esta práctica legítima y apoya los conocimientos tradicionales campesinos, siendo modelos para la gestión de recursos agrícolas y la restauración del suelo (Kolapo & Kolapo, 2023). Esta técnica es especialmente útil en suelos degradados, restaurando su estructura y biodiversidad. Además, reduce la erosión, retiene la humedad y protege el suelo, aumentando el rendimiento de los cultivos y mitigando emisiones de gases de efecto invernadero (Chatterjee *et al.* 2022).

Agrosilvicultura: Puede mitigar los impactos ambientales, mejorar los servicios ecosistémicos, los recursos naturales y, al mismo tiempo, beneficiar a los pequeños agricultores en zonas rurales (Kheiri *et al.* 2023). Es posible mejorar la productividad del suelo y brindar sombra a cultivos sensibles al calor al integrar árboles en sistemas agrícolas.

La agrosilvicultura doméstica, en países en desarrollo, ha enriquecido la seguridad alimentaria, reducido la pobreza y promovido la equidad de género, al generar ingresos y empoderar a las mujeres (Ruba & Talucder, 2023). Además, contribuye a la conservación de la biodiversidad al proporcionar alimento y refugio para la fauna silvestre; los árboles, también reducen las emisiones de gases de efecto invernadero. La diversificación de cultivos y la integración de árboles fortalecen la resiliencia ante eventos climáticos extremos, mientras que la agroforestería mejora la seguridad alimentaria y económica, al ofrecer una fuente adicional de alimentos, madera y otros productos forestales, constituyendo una fuente de ingresos sostenible, a largo plazo.

Siembra directa: Implica sembrar sin labrar el suelo previamente, junto con la labranza cero y reducida, constituye tecnologías de producción limpia que promueven la eficiencia en el uso de recursos y la salud del suelo, abordando también la pobreza (Yadav *et al.* 2020). Al minimizar el uso de combustibles fósiles en la preparación del suelo, se reducen las emisiones de gases de efecto invernadero, se conserva la humedad del suelo y se previene la erosión, al mantener su estructura y reducir la pérdida de nutrientes (Souza *et al.* 2016). Además, al actuar como una barrera natural contra malezas e insectos puede disminuir la necesidad de plaguicidas, en especial, de herbicidas, contribuyendo a mantener la salud del suelo y la sostenibilidad alimentaria a largo plazo (Govaerts *et al.* 2007; Gruber *et al.* 2011; Sharma *et al.* 2011).

Uso de variedades de cultivos resistentes al clima: El uso de variedades de cultivos resistentes al clima es esencial para los pequeños agricultores expuestos a amenazas climáticas (Fischer *et al.* 2016). Estas variedades garantizan el crecimiento de los cultivos ante desafíos climáticos, al resistir condiciones extremas, representando una estrategia eficaz de adaptación al cambio climático (Dutta *et al.* 2022). Además de reducir la vulnerabilidad de los agricultores, contribuyen a disminuir la dependencia de plaguicidas y fertilizantes químicos, lo que ayuda a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y mejora la calidad del suelo y del agua.

Creación de espacios comerciales específicos para productores agroecológicos: Los espacios comerciales, como mercados o ferias, permiten a los agricultores vender sus productos directamente a los consumidores locales, evitando intermediarios y obteniendo precios más justos. Los consumidores locales pueden interactuar directamente con los agricultores, conociendo sus prácticas agrícolas y generando mayor confianza en los productos y en la agricultura en general. Como alternativa a la falta de reconocimiento por parte de la industria, la creación de espacios comerciales específicos permitirá fortalecer el poder de negociación de los agricultores con la industria y acceder a certificaciones colectivas a menor costo. Igualmente, la organización, mediante cooperativas, permitirá generar redes de distribución y comercialización directas, reduciendo la dependencia de intermediarios.

Agua de lluvia: Según Hume *et al.* (2022), la recolección de aguas pluviales es una solución efectiva para suplir el agua agrícola, reduciendo la presión sobre las fuentes de agua dulce locales. Esta práctica, útil durante las sequías, también combate la erosión y mejora la salud del suelo, especialmente, en áreas propensas a la degradación. La captación de agua de lluvia permite mantener la humedad del suelo y disminuir la necesidad de riego con agua tratada, lo que reduce la dependencia de suministros externos (Liang & van Dijk, 2011).

Sistemas de alerta temprana: Los sistemas de alerta temprana permiten a los agricultores prepararse para estos eventos, reduciendo sus impactos negativos en los cultivos (Masupha *et al.* 2021). Basados en datos meteorológicos, alertan a los agricultores con anticipación para que tomen medidas preventivas, como cosechar anticipadamente o aplicar técnicas de manejo del suelo, fortaleciendo la resiliencia agrícola y garantizando la seguridad alimentaria regional (De la Casa *et al.* 2021). En la zona rural de Medellín, donde la subsistencia depende de los cultivos, la adopción de estos sistemas, que pueden incluir vigilancia climática y alertas móviles, podría ser fundamental.

Policultivos: Los policultivos, que implican la siembra de diferentes cultivos en un mismo terreno, pueden mejorar la resistencia y la capacidad de recuperación del sistema agrícola. Además de sus ventajas agrícolas, al contribuir a la salud del suelo y la reducción de la erosión, los policultivos ofrecen beneficios ambientales significativos. La diversidad de cultivos conserva nutrientes y agua en el suelo, mientras que la mayor biodiversidad en áreas agrícolas mejora la calidad del aire, suelo y agua.

Para promover la sostenibilidad de la producción agrícola en la zona rural de Medellín, se pueden implementar diversas prácticas climáticas inteligentes y adaptativas. La creación de espacios comerciales dedicados a los productores agroecológicos y el fomento de los policultivos impulsan la agricultura sostenible y fortalecen la economía local. Por último, el uso de variedades de cultivos resistentes al clima y la adopción de técnicas de siembra directa pueden aumentar la productividad y reducir la dependencia de insumos externos.

Agradecimientos. Los autores agradecen a la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura -FAO- y a la Alcaldía de Medellín. **Contribución de los autores:** Dennys Herrera-Ramírez: conceptualización, investigación, análisis formal, escritura borrador original. Lina Buelvas-Gutiérrez: conceptualización, metodología, escritura, revisión y edición, concepción y diseño del estudio. Efrain A. Boom Cárcamo: análisis formal, visualización, revisión crítica, escritura, revisión y edición. **Conflicto de intereses:** El manuscrito fue preparado y revisado con la participación de todos los autores, quienes declaramos que no existe ningún conflicto de intereses que ponga en riesgo la validez de los resultados presentados. **Financiación:** Convenio de cooperación internacional UTF/COL/133/COL entre la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura -FAO- y la Alcaldía de Medellín -Gerencia de corregimientos- para la ejecución de proyectos asociados al desarrollo rural sostenible.

REFERENCIAS

- AGUDELO PATIÑO, L.C. 2012. Ruralidad metropolitana. Entre la tradición rural y el brillo urbano. Una interpretación. *Bulletin de l'Institut français d'études andines*. 41(3):555-571. <https://doi.org/10.4000/bifea.432>
- ALTIERI, M.A. 2018. *Agroecology: The science of sustainable agriculture*. CRC Press. p. 448.
- ANTWI-AGYEI, P.; DOUGILL, A.J.; STRINGER, L.C. 2015. Impacts of land tenure arrangements on the adaptive capacity of marginalized groups: The case of Ghana's Ejura Sekyedumase and Bongo districts. *Land Use Policy*. 49:203-212. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.08.007>
- CABRERA, M.; RAMÍREZ, W. 2014. Restauración ecológica de los páramos de Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. p. 296.
- CASTRO, B.; SEN, R. 2022. Everyday adaptation: Theorizing climate change adaptation in daily life. *Global Environmental Change*. 75:102555. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2022.102555>
- CHANDRA, A.; MCNAMARA, K.E.; DARGUSCH, P. 2018. Climate-smart agriculture: perspectives and framings. *Climate Policy*. 18(4):526-541. <https://doi.org/10.1080/14693062.2017.1316968>
- CHATTERJEE, R.; ISLAM, R.; ACHARYA, S.K.; BISWAS, A. 2022. Conservation agriculture: Analysis and prioritization of socio-ecological factors operating at farm levels in Ohio, USA. *Environmental Science & Policy*. 138:1-10. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.09.015>
- DE LA CASA, A.C.; OVANDO, G.G.; DÍAZ, G.J. 2021. ENSO influence on corn and soybean yields as a base of an early warning system for agriculture in Córdoba, Argentina. *European Journal of Agronomy*. 129:126340. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126340>
- DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO NACIONAL DE ESTADÍSTICAS, DANE. 2019. Resultados del censo nacional de población y vivienda 2018. Disponible desde Internet en: <https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/grupos-etnicos/presentacion-grupos-etnicos-2019.pdf>
- DUTTA, A.; TRIVEDI, A.; NATH, C.P.; GUPTA, D.S.; HAZRA, K.K. 2022. A comprehensive review on grain legumes as climate-smart crops: Challenges and prospects. *Environmental Challenges*. 7:100479. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100479>
- EREKALO, K.T.; PEDERSEN, S.M.; CHRISTENSEN, T.; DENVER, S.; GEMTOU, M.; FOUNTAS, S.; ISAKHANYAN, G. 2024. Review on the contribution of farming practices and technologies towards climate-smart agricultural outcomes in a European context. *Smart Agricultural Technology*. 7:100413. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100413>
- FILE, D.J.M.-B.; NHAMO, G. 2023. Farmers' choice for indigenous practices and implications for climate-smart agriculture in northern Ghana. *Heliyon*. 9(11):e22162. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e22162>
- FISCHER, H.W.; REDDY, N.L.N.; RAO, M.L.S. 2016. Can more drought resistant crops promote more climate secure agriculture? Prospects and challenges of millet cultivation in Ananthapur, Andhra Pradesh. *World Development Perspectives*. 2:5-10. <https://doi.org/10.1016/j.wdp.2016.06.005>
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, FAO. 2018. Elementos de la agroecología. Guía para la transición hacia sistemas alimentarios y agrícolas sostenibles.
- GARCÍA LÓPEZ, V.; GIRALDO, O.F.; MORALES, H.; ROSSET, P.M.; DUARTE, J.M. 2019. Seed sovereignty and agroecological scaling: Two cases of seed recovery, conservation, and defense in Colombia. *Agroecology and Sustainable Food Systems*. 43(7-8):827-847. <https://doi.org/10.1080/21683565.2019.1578720>

- GOVAERTS, B.; FUENTES, M.; MEZZALAMA, M.; NICOL, J.M.; DECKERS, J.; ETCHEVERS, J.D.; FIGUEROA-SANDOVAL, B.; SAYRE, K.D. 2007. Infiltration, soil moisture, root rot and nematode populations after 12 years of different tillage, residue and crop rotation managements. *Soil and Tillage*. 94(1):209-219. <https://doi.org/10.1016/j.still.2006.07.013>
- GRUBER, S.; MÖHRING, J.; CLAUPEIN, W. 2011. On the way towards conservation tillage-soil moisture and mineral nitrogen in a long-term field experiment in Germany. *Soil and Tillage*. 115-116:80-87. <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.07.001>
- HUME, I.V.; SUMMERS, D.M.; CAVAGNARO, T.R. 2022. Lawn with a side salad: Rainwater harvesting for self-sufficiency through urban agriculture. *Sustainable Cities and Society*. 87:104249. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104249>
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, IPCC. 2014. Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: global and sectoral aspects. Contribution of Working Group II to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- KHEIRI, M.; KAMBOUZIA, J.; SAYAHNIA, R.; SOUFIZADEH, S.; MAHDAVI DAMGHANI, A.; AZADI, H. 2023. Environmental and socioeconomic assessment of agroforestry implementation in Iran. *Journal for Nature Conservation*. 72:126358. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2023.126358>
- KOLAPO, A.; KOLAPO, A.J. 2023. Implementation of conservation agricultural practices as an effective response to mitigate climate change impact and boost crop productivity in Nigeria. *Journal of Agriculture and Food*. 12:100557. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100557>
- LIANG, X.; VAN DIJK, M.P. 2011. Economic and financial analysis on rainwater harvesting for agricultural irrigation in the rural areas of Beijing. *Resources, Conservation and Recycling*. 55(11):1100-1108. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.06.009>
- MANZUR-TOLEDO, V.M.; BARRERA-BASSOLS, N. 2009. A etnoecología: uma ciência pós-normal que estuda as sabedorias tradicionais. *Desenvolvimento e Meio ambiente*. 20. <http://dx.doi.org/10.5380/dma.v20i0.14519>
- MASUPHA, T.E.; MOELETSI, M.E.; TSUBO, M. 2021. Prospects of an agricultural drought early warning system in South Africa. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 66:102615. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2021.102615>
- MOISÁ, L.; HERNÁNDEZ, A. 2010. El desarrollo rural de Medellín (Colombia) desde la perspectiva del desarrollo endógeno. *Agronomía Colombiana*. 28(3):515-523.
- MONTOYA-ROJAS, G.; RIVERA-MARROQUÍN, M. 2021. Los componentes ambientales de la cuenca Torca: un insumo para el análisis de los escenarios de variabilidad climática en la ciudad de Bogotá, Colombia. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*. 24(1):e1833. <https://doi.org/10.31910/rudca.v24.n1.2021.1833>
- NYASIMI, M.; KIMELI, P.; SAYULA, G.; RADENY, M.; KINYANGI, J.; MUNGAI, C. 2017. Adoption and dissemination pathways for climate-smart agriculture technologies and practices for climate-resilient livelihoods in Lushoto, Northeast Tanzania. *Climate*. 5(3):cli5030063. <https://doi.org/10.3390/cli5030063>
- PARDO-LOCARNO, L.C.; MONTOYA-LERMA, J.; BELLOTTI, A.C.; VAN SCHOONHOVEN, A. 2005. Structure and composition of the white grub complex (Coleoptera: Scarabaeidae*) in agroecological systems of northern Cauca, Colombia. *Florida Entomologist*. 88(4):355-363. [https://doi.org/10.1653/0015-4040\(2005\)88\[355:SACOTW\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1653/0015-4040(2005)88[355:SACOTW]2.0.CO;2)
- PÖRTNER, H.O.; SCHOLES, R.J.; AGARD, J.; ARCHER, E.; ARNETH, A.; BAI, X.; BARNES, D.; BURROWS, M.; CHAN, L.; CHEUNG, W. 2021. IPBES-IPCC co-sponsored workshop report on biodiversity and climate change. IPBES and IPCC. 28.
- PROYUNGAS. 2025. Paisaje productivo protegido. Disponible desde Internet en: <https://proyungas.org.ar/categoria-proyecto/paisaje-productivo-protegido/>
- RAMÍREZ-SANTOS, A.G.; RAVERA, F.; RIVERA-FERRE, M.G.; CALVET-NOGUÉS, M. 2023. Gendered traditional agroecological knowledge in agri-food systems: a systematic review. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*. 19:11. <https://doi.org/10.1186/s13002-023-00576-6>
- RUBA, U.B.; TALUCDER, M.S.A.; ZAMAN, M.N.; MONTAHA, S.; TUMPA, M.F.A.; DUEL, M.A.K.; PUJA, R.S.; TRIZA, A.H. 2024. The status of implemented climate smart agriculture practices preferred by farmers of haor area as a climate resilient approach. *Heliyon*. 104:e25780. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25780>
- RUBA, U.B.; TALUCDER, M.S.A. 2023. Potentiality of homestead agroforestry for achieving sustainable development goals: Bangladesh perspectives. *Heliyon*. 9(3):e14541. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14541>

- SANHUEZA-AROS, J.; PEÑA-CORTÉS, F. 2020. Vista de Uso de la prospectiva estratégica, ordenación territorial y evaluación de impacto como base para la sostenibilidad de los sistemas agrícolas. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*. 25(1):e2148. <https://doi.org/10.31910/rudca.v25.nSupl.1.2022.2148>
- SHARMA, P.; ABROL, V.; SHARMA, R.K. 2011. Impact of tillage and mulch management on economics, energy requirement and crop performance in maize–wheat rotation in rainfed subhumid inceptisols, India. *European Journal of Agronomy*. 34(1):46-51. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2010.10.003>
- SOUZA, J.V.R.S.; SAAD, J.C.C.; SÁNCHEZ-ROMÁN, R.M.; RODRÍGUEZ-SINOBAS, L. 2016. No-till and direct seeding agriculture in irrigated bean: Effect of incorporating crop residues on soil water availability and retention, and yield. *Agricultural Water Management*. 170:158-166. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.01.002>
- TADESSE, B.; AHMED, M. 2023. Impact of adoption of climate smart agricultural practices to minimize production risk in Ethiopia: A systematic review. *Journal of Agriculture and Food Research*. 13:100655. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100655>
- WEZEL, A.; HERREN, B.G.; KERR, R.B.; BARRIOS, E.; GONÇALVES, A.L.R.; SINCLAIR, F. 2020. Agroecological principles and elements and their implications for transitioning to sustainable food systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development*. 40:40. <https://doi.org/10.1007/s13593-020-00646-z>
- WOOD, S.A.; JINA, A.S.; JAIN, M.; KRISTJANSON, P.; DEFRIES, R.S. 2014. Smallholder farmer cropping decisions related to climate variability across multiple regions. *Global Environmental Change*. 25:163-172. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2013.12.011>
- YADAV, G.S.; BABU, S.; DAS, A.; MOHAPATRA, K.P.; SINGH, R.; AVASTHE, R.K.; ROY, S. 2020. No-till and mulching enhance energy use efficiency and reduce carbon footprint of a direct-seeded upland rice production system. *Journal of Cleaner Production*. 271:122700. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122700>
- YAMANE, T. 1967. *Statistics, an introductory analysis*. Segunda edición. Harper and Row. New York. 919p.
- YELELIERE, E.; NYAMEKYE, A.B.; ANTWI-AGYEI, P.; BOAMAH, E.F. 2022. Strengthening climate adaptation in the northern region of Ghana: insights from a stakeholder analysis. *Climate Policy*. 22(9-10):1169-1185. <https://doi.org/10.1080/14693062.2022.2134085>

Uso de aditivos nutraceuticos mejora el desarrollo intestinal y la salud productiva durante el post destete porcino

The use of nutraceutical additives improves intestinal development and productive health during post-weaning in pigs

Jaime A. Ángel-Isaza^{1*} ; Tomas A. Madrid-Garcés² ; Víctor Herrera-Franco² ;
Albeiro López-Herrera³ ; Jaime E. Parra-Suescún³ 

¹Promitec Santander, Unidad de Investigación, innovación y Desarrollo Promitec Santander. Bucaramanga – Santander, Colombia; e-mail: jangeli@unal.edu.co

²Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, Grupo de Investigación Biodiversidad y Genética Molecular, BIOGEM. Medellín – Antioquia, Colombia; e-mail: tamadridg@unal.edu.co; vhherrer@unal.edu.co

³Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, Facultad de Ciencias Agrarias, Grupo de Investigación Biodiversidad y Genética Molecular, BIOGEM. Medellín – Antioquia, Colombia; e-mail: alherrera@unal.edu.co; jeparrasu@unal.edu.co

*autor para correspondencia: jangeli@unal.edu.co

Cómo citar: Ángel-Isaza, J.A.; Madrid-Garcés, T.A.; Herrera-Franco, V.; López-Herrera, A.; Parra-Suescún, J.E. 2025. Uso de aditivos nutraceuticos mejora el desarrollo intestinal y la salud productiva durante el post destete porcino. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 28(1):e2556. <http://doi.org/10.31910/rudca.v28.n1.2025.2556>

Artículo de acceso abierto publicado por Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, bajo una Licencia Creative Commons CC BY-NC 4.0

Publicación oficial de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Institución de Educación Superior Acreditada en Alta Calidad por el Ministerio de Educación Nacional

Recibido: marzo 4 de 2024

Aceptado: mayo 20 de 2025

Editado por: Helber Adrián Arévalo Maldonado

RESUMEN

El mantenimiento de la salud intestinal durante el período post destete representa un desafío en la porcicultura, debido a la concurrencia de diversos estresores que afectan el rendimiento productivo y predisponen a trastornos gastrointestinales. Ante la necesidad de reducir el uso de antibióticos promotores del crecimiento, los aditivos nutraceuticos se consideran como una alternativa viable, por lo tanto, se evaluó el efecto de diferentes aditivos nutraceuticos sobre las variables morfométricas intestinales y su relación con el desempeño productivo en lechones. Se utilizaron 240 lechones destetados a los 21 días de edad, asignados aleatoriamente a seis tratamientos: D1, dieta basal comercial; D2, D1 + bacitracina de zinc (150 ppm); D3, D1 + maltodextrina (550 ppm); D4, D1 + fructooligosacáridos (300 ppm); D5, D1 + aceite esencial de *Lippia origanoides* (69 ppm) y D6, D1 + humatos de sodio (750 ppm). Se evaluaron parámetros zootécnicos y se recolectaron muestras de duodeno y yeyuno en los días 0, 15 y 30, para análisis morfométrico y determinación de pH intestinal. Los lechones que recibieron D4 y D5 presentaron una mejora de 0,08 y 0,07 puntos en la conversión alimenticia, en comparación con D2. Además, se observó un incremento en el desarrollo morfométrico intestinal de hasta el 31 y 27 %, a los días 15 y 30, respectivamente. En conclusión, la suplementación con fructooligosacáridos o aceite esencial de *L. origanoides* mejora la integridad intestinal y el rendimiento productivo, constituyendo una alternativa eficaz al uso de antibióticos en la alimentación post destete.

Palabras clave: Aceite esencial; Bacitracina de zinc; Fructooligosacáridos; Humatos de sodio; Prebiótico.

ABSTRACT

Maintaining intestinal health during the post-weaning period represents a challenge in pig production, due to the convergence of various stressors that affect productive performance and predispose animals to gastrointestinal disorders. Considering the need to reduce the use of antibiotic growth promoters, nutraceutical additives have emerged as a viable alternative. Therefore, the effect of different nutraceutical feed additives was evaluated on intestinal morphometric variables and their relationship with productive performance in piglets. A total of 240 piglets weaned at 21 days of age were randomly assigned to six treatments: D1, commercial basal diet; D2, D1 + zinc bacitracin (150 ppm); D3, D1 + maltodextrin (550 ppm); D4, D1 + fructooligosaccharides (300 ppm); D5, D1 + *Lippia origanoides* essential oil (69 ppm); and D6, D1 + sodium humates (750 ppm). Productive performance parameters were recorded, and samples of duodenum and jejunum were collected on days 0, 15, and 30 for morphometric analysis and intestinal pH measurement. Piglets fed D4 and D5 showed improvements of 0.08 and 0.07 points in feed conversion ratio, respectively, compared to D2. Additionally, an increase in intestinal morphometric development of up to 31% and 27%, respectively, was observed on days 15 and 30. In conclusion, supplementation with fructooligosaccharides or *L. origanoides* essential oil enhances intestinal integrity and productive performance, representing an effective alternative to the use of antibiotics in post-weaning diets.

Keywords: Essential oil; Fructooligosaccharides; Prebiotic; Sodium humates; Zinc bacitracin.

INTRODUCCIÓN

En el ciclo de producción de carne porcina, el destete se considera uno de los períodos más críticos durante todo el período de crecimiento y manejo de los cerdos, debido a que se asocia con factores estresores de tipo ambiental, social y nutricional, dando como resultado un bajo consumo de alimento, reducida ganancia de peso corporal, una alta incidencia de diarreas y, finalmente, el aumento en la mortalidad de lechones (Kim & Duarte, 2021). Adicionalmente, a nivel intestinal, las consecuencias de estos estresores durante el post destete inducen cambios profundos en el tracto gastrointestinal (TGI) de los cerdos (Zheng *et al.* 2021).

Referente a lo histológico, durante las primeras semanas del período post destete, se producen daños morfológicos epiteliales caracterizados, principalmente, por atrofia en el crecimiento de vellosidades e hiperplasia de las criptas, generadas por una mayor tasa de pérdida de células epiteliales intestinales, con reducción en la tasa de renovación de estas. Esta pérdida de células en los segmentos apicales de las vellosidades se acompaña de una mayor producción de células, a nivel de las criptas, lo que da lugar a hallazgos histomorfométricos, caracterizados por vellosidades cortas y mayor profundidad de las criptas, que en términos de lo productivo, se asocia con una menor capacidad digestiva y, por tanto, una disminución del crecimiento esperado en los animales durante este periodo (Lata, 2022).

Asimismo, los problemas intestinales de los lechones asociados al período post destete convergen sintomatológicamente en la aparición y aumento de diarreas, las cuales, se observan, en particular, durante los primeros 14 días post destete, en los que se evidencian altas tasas de defecación, con mayor volumen y contenido de agua. La aparición de estas diarreas se asocia con problemas de disbiosis intestinal y, particularmente, con el aumento en la abundancia de algunos microorganismos patobiontes, como cepas de *Escherichia coli* enterotoxigénica, afectando, a su vez, la estructura e integridad de la mucosa intestinal (Eriksen *et al.* 2021).

Para tratar de controlar esta problemática, la industria recurre al uso de antimicrobianos en el alimento para evitar la proliferación de diferentes microorganismos patobiontes y así reducir la sintomatología asociada a los daños intestinales, durante el periodo post destete. Por lo anterior, es recurrente la adición en el alimento balanceado de grandes cantidades de antibióticos de forma profiláctica o como promotores de crecimiento (APC); sin embargo, con la creciente preocupación de la salud pública por la generación de patógenos resistentes a diferentes antibióticos y la consecuente prohibición en algunos países del uso de estas sustancias en producción animal, es necesario buscar alternativas naturales, que permitan mantener la salud intestinal de los lechones y los parámetros productivos, reduciendo de manera parcial o total la inclusión de los APC (Zheng *et al.* 2021).

Como alternativas al uso de los APC en la reducción de los problemas de salud intestinal de los lechones durante el periodo post destete, se plantea el uso de diversos tipos de aditivos alimenticios moduladores de la integridad intestinal: prebióticos, probióticos, fitobióticos o acidificantes, los cuales, a través de diferentes mecanismos de acción, han demostrado capacidad para promover el desarrollo de las estructuras que componen la mucosa intestinal, disminuir las tasas de aparición de eventos diarreicos

y mejorar las variables zootécnicas de la producción (Herrera Franco *et al.* 2022). Por lo anterior, el objetivo del presente estudio fue evaluar la suplementación con diferentes aditivos nutracéuticos, como el aceite esencial de *Lippia origanoides*, el fructooligosacárido de cadena corta, los humatos de sodio y la maltodextrina sobre el desarrollo de la morfometría (integridad) intestinal y su relación con la salud y la producción de cerdos, durante el período post destete.

MATERIALES Y MÉTODOS

Consideraciones éticas. La investigación contó con aval del Comité para el Cuidado y Uso de los Animales (CICUA) de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Todos los procedimientos experimentales realizados con los animales se desarrollaron siguiendo los lineamientos de la Guía de Cuidado y Uso de Animales de Granja para la Investigación (ICLAS, 2012).

Sitio de realización del estudio. El trabajo de campo fue realizado en una granja porcícola comercial, localizada en la vereda “El Zancudo”, municipio de Entreríos, Antioquia. El predio se encuentra a una altitud aproximada de 2.300 m s.n.m., en una zona de vida bosque muy húmedo Montano bajo (bmh-MB), con una temperatura entre 18 a 24 °C, con una precipitación media mensual de 208 mm y una humedad relativa de 70 %.

Animales. Se utilizaron 240 lechones (machos de cruce terminal comercial) destetados a los 21 días de edad, con un peso promedio de $6,61 \pm 0,08$ kg. Los lechones fueron seleccionados de manera aleatoria el día del destete y se alojaron en grupos de ocho animales en corrales de 5 m², con una densidad final de cría comercial de 0,35 m² por animal (Padilla Pérez, 2007). El agua y el alimento fue ofrecido a voluntad durante todo el periodo experimental y se llevó a cabo el registro del consumo de alimento de los diferentes grupos, con prácticas de manejo, realizadas según procedimientos comerciales. Durante la lactancia no se les suministró alimento sólido y ningún tipo de compuesto antibiótico a los lechones.

Manejo sanitario. Para el recibimiento de los lechones se realizó lavado, limpieza y desinfección de los corrales de precebo, cortinas, comederos y bebederos; además, se hizo el control de roedores e insectos con productos obtenidos en casas comerciales. Los lechones llegaron de lactancia con el plan de vacunación del sistema de producción establecido (Patiño F. *et al.* 2019).

Dietas experimentales. Durante el periodo experimental los animales fueron alimentados con un alimento balanceado/formulado, de acuerdo con las recomendaciones de Rostagno (2017), obteniendo una dieta basal (DB) sin antibiótico promotor de crecimiento (APC) ni aditivos alimenticios. Para la conformación de cada uno de los tratamientos, a la DB se le adicionó APC o uno de los cuatro aditivos nutracéuticos, conformando cada una de las dietas experimentales, así: Dieta 1 (D1) o dieta basal (DB): alimento balanceado sin aditivos; Dieta 2 (D2): DB con la adición de bacitracina de zinc a 150 ppm (APC); Dieta 3 (D3): DB con la adición de 550 ppm de maltodextrina (MD); Dieta 4 (D4): DB con la adición de 300 ppm fructooligosacáridos de cadena corta (FOS); Dieta 5 (D5): DB con la adición de 69 ppm de aceite esencial de

Lippia origanoides (AEO) y Dieta 6 (D6): DB con la adición de 750 ppm humatos de sodio (HS).

Todos los aditivos nutraceuticos empleados en el estudio fueron suministrados por la empresa Promitec Santander (Colombia) y se siguieron las recomendaciones de uso y dosificación sugeridas por el fabricante.

Parámetros clínicos. Respecto a las variables clínicas, se evaluó la temperatura corporal de los lechones y el índice de severidad de diarreas (ISD); para esto, diariamente, durante los primeros 15 días post destete, se evaluó la temperatura rectal de los lechones, utilizando un termómetro digital LD-00045 (LORD®). Esta medición fue realizada una vez al día introduciendo el termómetro vía rectal en cada lechón durante 30 segundos, momento en el que el dato marcado en el termómetro fue registrado.

La determinación de ISD fue realizada según lo descrito por Patiño F. *et al.* (2019), para lo cual, se realizó evaluación de la consistencia fecal por parte de dos evaluadores, empleando una escala con calificación de 0 a 3, donde el valor 0 indica heces normales, sin presencia de diarrea; el valor 1 describe una diarrea ligera, pastosa; el valor 2, una diarrea moderada, semilíquida y el valor 3 una diarrea severa, muy líquida. La calificación fue registrada diariamente durante todo el periodo experimental para posteriormente realizar el cálculo de del índice de severidad de diarrea ISD, a partir de la siguiente ecuación (Reis-De Souza *et al.* 2010):

$$ISD = (\sum CFd) / Pe$$

Dónde:

CFd = calificación de la consistencia fecal diaria

Pe = periodo experimental

Parámetros productivos. Cada semana, durante el periodo experimental y utilizando una balanza digital, se realizó pesaje de todas las unidades experimentales (animales); además, se pesó el alimento ofrecido y sobrante. Con esta información se analizaron las variables de peso vivo (PV) y consumo de alimento; adicionalmente, se calculó la variable de conversión alimenticia acumulada (CAA) usando las siguiente fórmula (Herrera Franco *et al.* 2022):

$$CAA = \frac{\text{Alimento consumido (Kg)}}{\text{Ganancia de peso (Kg)}}$$

Buenas prácticas de eutanasia y toma de muestras. Para la obtención de muestras se realizó el sacrificio de un animal al azar por unidad experimental, los días 0, 15 y 30 del periodo post destete. El proceso de eutanasia se efectuó siguiendo las recomendaciones de la Guía de cuidado y uso de animales de granja para la investigación (Canadian Council on Animal Care, 2009). Después del sacrificio, se diseccionó la región abdominal y se extrajo completamente el intestino delgado, para posteriormente obtener muestras de 5 cm de duodeno y yeyuno, las cuales, se almacenaron en formalina buferada al 10 %, hasta el momento del procesamiento histotécnico (Ciro Galeano *et al.* 2016).

Morfometría intestinal. Las muestras de duodeno y yeyuno se deshidrataron en alcohol etílico a 70, 80, 90, 100 % y diafanizadas en xilol, para su posterior inclusión en parafina. Con el uso de un micrótomato rotatorio se obtuvieron cortes de 4 µm de espesor de cada muestra, para posteriormente ser teñidos con hematoxilina-eosina y puestos en láminas portaobjetos, para el análisis morfológico. Las láminas con los cortes histológicos se analizaron cuantitativamente, mediante procesamiento de imágenes digitales computarizadas, para lo cual, se empleó una cámara digital instantánea Motican 2.300 (Motic, Hong Kong, China), con una resolución de tres megapíxeles acoplada a un microscopio óptico Leica DLMB (Meyer, Houston, TX, USA), para la obtención de imágenes de los cortes histológicos a un aumento de 200x. Con las imágenes obtenidas de cada muestra, utilizando el programa de procesamiento de imagen Motic® Images plus 2.0 (Motic, Hong Kong, China), se realizó las mediciones de la longitud de las vellosidades (LV), ancho de vellosidades (AV) y la profundidad de las criptas, según lo descrito por Barrera-Barrera *et al.* (2014). Adicionalmente, se calculó la variable de relación de longitud de vellosidad/profundidad de cripta (V:C), según lo descrito por Santos *et al.* (2022).

Análisis del pH intestinal. Para la determinación del pH intestinal se tomó un gramo de muestra de contenido de duodeno y yeyuno de cada unidad experimental. Inmediatamente, cada muestra de contenido fue suspendida en 12,5 ml de agua destilada-desionizada, la cual, fue agitada manualmente con agitador de vidrio. Finalmente, en la mezcla se insertó el electrodo de pH y se realizaron las lecturas con un potenciómetro de precisión de dos decimales (Madrid-Garcés *et al.* 2018).

Diseño experimental y análisis estadístico. El día del destete los animales fueron pesados y distribuidos de forma aleatoria en 30 corrales de ocho animales cada uno, siguiendo un diseño experimental en bloques completos al azar, compuesto por cinco repeticiones, para cada una de las seis dietas, siendo cada corral una unidad experimental y determinándose la ubicación de los corrales (salón), como el factor de bloqueo.

El análisis estadístico de las variables productivas y los parámetros clínicos fue realizado por medio del procedimiento de medidas repetidas del paquete “nlme” del programa RStudio (RStudio Team, 2020); para las variables morfométricas y pH de los diferentes segmentos intestinales se realizó comparaciones entre dietas, en cada una de las edades de medición, por medio de la prueba de ANOVA, con un alfa de 0,05. Para la comparación de las medias entre cada tratamiento se utilizó una prueba de Tukey, empleando el paquete “agricolae” del programa RStudio. Finalmente, mediante el método de Pearson se analizó la correlación entre cada una de las variables evaluadas durante el experimento.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La evaluación de las variables clínicas en los lechones evidenció que la temperatura rectal de los lechones no difirió significativamente ($p > 0,05$) entre las dietas, en ninguno de los días de medición. Por su parte, el estado de las defecaciones evaluadas, mediante el ISD, durante el periodo post destete, evidenció que hubo una reducción significativa ($p < 0,001$) de las diarreas en los animales de los grupos D3, D4, D5 y D6, respecto

a los grupos D1 y D2, siendo el grupo D4 el que presentó el menor ISD, en los dos periodos evaluados (Figura 1).

En cuanto al análisis de los diferentes parámetros productivos se encontró interacción entre dietas y edades de los animales para la variable de PV, por lo que se analizaron los efectos de manera independiente. La variable de CAA no presentó interacción entre los tratamientos y la edad, por lo que se analizó el efecto principal de cada factor. Respecto a la variable PV de los lechones durante el periodo experimental, se observó que los lechones partieron al día 0 (día de

destete), con un PV de $6,61 \pm 0,08$ Kg, sin diferencias significativas ($p > 0,05$) entre las dietas. Tanto para el día 15 como el 30 post destete, se observaron diferencias significativas ($p < 0,001$) entre dietas, donde los lechones que recibieron la dieta D4, seguido de D5, presentaron el mayor PV. En el análisis de los efectos principales de la conversión alimenticia se observó que, independientemente de la edad de evaluación, los animales que fueron suplementados con las dietas D4 y D5, presentaron una CAA significativamente ($p < 0,001$), menor que el resto de las dietas empleadas en el estudio (Tabla 1).

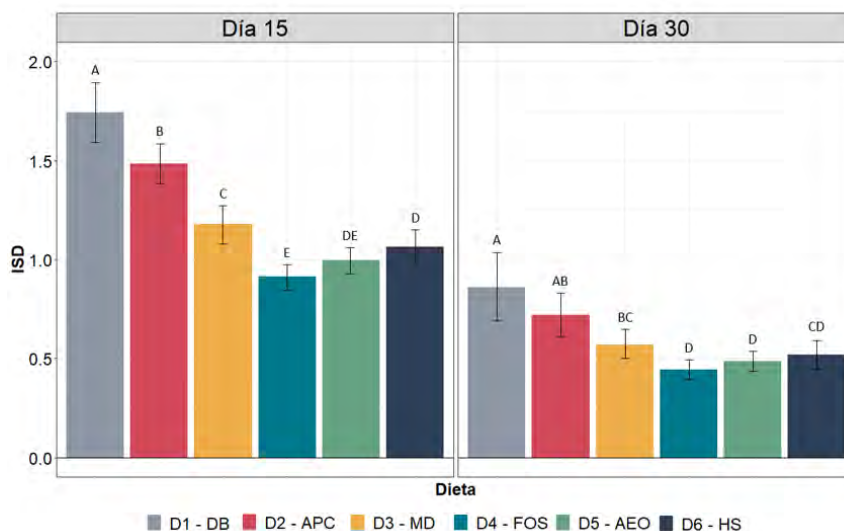


Figura 1. Efecto de la suplementación de aditivos alimenticios sobre el índice de severidad de diarreas (ISD) de lechones, en los días 15 y 30, del periodo post destete.

D1: Alimento balanceado sin aditivos-DB; D2: DB + 150 ppm de Bacitracina de Zinc- APC; D3: DB + 550 ppm de maltodextrina- MD; D4: DB + 300 ppm de fructooligosacarido- FOS; D5: DB + 69 ppm de aceite esencial de Lippia organoide s- AEO; D6: DB + 750 ppm humatos de sodio- HS.

Letras comunes A, B, C, D y E dentro de la misma edad de evaluación indican medias de dietas, que no difieren significativamente en la prueba de Tukey ($p < 0,05$).

Tabla 1. Efecto de la suplementación con diferentes aditivos nutracéuticos sobre el rendimiento productivo de lechones durante los primeros 30 días post destete.

Variable	Día	Media general	D1 - DB	D2 - APC	D3 - MD	D4 - FOS	D5 - AEO	D6 - HS	EEM	P Dieta	P Día	Dieta x Día
Peso vivo (Kg)	0	6,61	6,64 ^A	6,60 ^A	6,64 ^A	6,61 ^A	6,56 ^A	6,57 ^A	0,015	<0,001	<0,001	<0,001
	15	12,76	12,04 ^E	12,33 ^D	12,69 ^C	13,54 ^A	13,23 ^B	12,74 ^C	0,097			
	30	20,99	19,60 ^E	20,33 ^D	20,85 ^C	22,54 ^A	21,76 ^B	20,84 ^C	0,179			
Consumo acumulado (Kg)	15	8,04	7,42 ^D	7,69 ^{CD}	8,01 ^{BC}	8,73 ^A	8,35 ^{AB}	8,06 ^{BC}	0,086	<0,001	<0,001	<0,001
	30	19,74	18,73 ^D	19,29 ^{CD}	19,57 ^C	21,17 ^A	20,31 ^B	19,39 ^C	0,155			
CAA (g:g)	15	1,310	1,37 ^D	1,34 ^C	1,32 ^{BC}	1,26 ^A	1,25 ^A	1,31 ^B	0,009	<0,001	<0,001	0,069
	30	1,375	1,45 ^D	1,41 ^C	1,38 ^{BC}	1,33 ^A	1,34 ^A	1,36 ^B	0,008			

EEM: Error estándar de la media; CAA: Conversión alimenticia acumulada; D1: Alimento balanceado sin aditivos-DB; D2: DB + 150 ppm de Bacitracina de Zinc-APC; D3: DB + 550 ppm de maltodextrina- MD; D4: DB + 300 ppm de fructooligosacarido-FOS; D5: DB + 69 ppm de aceite esencial de Lippia organoides-AEO; D6: DB + 750 ppm humatos de sodio-HS.

Letras diferentes en superíndice A, B, C, D, E dentro de la misma fila indican diferencias en los contrastes (TUKEY) entre las dietas, dentro de cada edad de evaluación ($\alpha < 0,05$).

En concordancia con los hallazgos de este estudio para la dieta D5 (AEO), Dieguez *et al.* (2022) reportaron que lechones suplementados con una dosis de 75 ppm de AEO, presentaron mayores ganancias de peso al día 72, en comparación con animales control, lo cual, se acompañó de la mejoría en diversas variables de salud intestinal, donde resaltan el aumento de la citrulina plasmática y el incremento de la producción de ácidos grasos de cadena corta (AGCC) en heces; metabolitos indicativos de desarrollo y actividad (integridad) intestinal durante el periodo de desafío que representa el post destete (Dieguez *et al.* 2022; Kiernan *et al.* 2023).

Asimismo, estos resultados son similares con los estudios de Patiño F. *et al.* (2019) y Maya-Ortega *et al.* (2021), donde al suplementar lechones con AEO en el mismo periodo, presentaron ganancias diarias de peso entre 60 y 61 g, comparadas con los animales que recibieron APC, lo que equivale a un incremento de entre el 13 y el 14 %. El aumento en la ganancia de peso y eficiencia alimenticia de los animales suplementados con aceites esenciales se asocia, principalmente, a dos mecanismos: a) la estimulación de secreción de enzimas digestivas, que permite aumentar la digestión/absorción de nutrientes y b) la estabilización del ecosistema microbiano intestinal, lo que conduce a una menor presentación de

trastornos digestivos, como las diarreas (Zhai *et al.* 2018). Estos hallazgos concuerdan con lo observado en la presente investigación.

Por su parte, el aumento de la productividad en cerdos durante el post destete por el uso de FOS (D4) se asocia a su capacidad de aumentar la producción de AGCC, como resultado de su fermentación por parte de bacterias beneficiosas presentes en el tracto gastrointestinal. Aunque una limitación de este estudio fue la ausencia de mediciones directas de AGCC en los diferentes segmentos del intestino delgado de los lechones post destete, se observó que el grupo que recibió suplementación con FOS (D4) presentó el pH más bajo en ambos segmentos evaluados, siendo significativamente ($p < 0,05$) inferior al resto de grupos. a nivel de yeyuno (Figura 2), indicando posiblemente una mayor producción de ácidos en dicho segmento por la fermentación del FOS, como compuesto prebiótico (Csernus & Czeplédi, 2020). Por este motivo, para próximas investigaciones, se debe profundizar en la producción de metabolitos microbianos con cada uno de los compuestos utilizadas, con el fin de dilucidar posibles mecanismos de acción de los aditivos nutraceuticos.

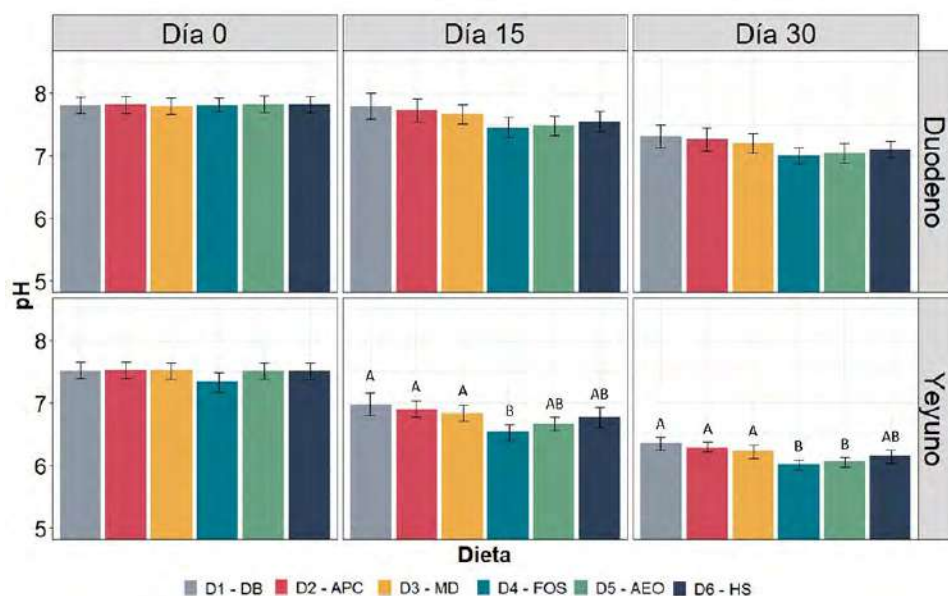


Figura 2. Efecto del uso de aditivos alimenticios sobre el pH de duodeno y yeyuno en lechones, en los días 0, 15 y 30, durante el periodo post destete.

D1: Alimento balanceado sin aditivos-DB; D2: DB + 150 ppm de Bacitracina de Zinc-APC; D3: DB + 550 ppm de maltodextrina-MD; D4: DB + 300 ppm de fructooligosacarido- FOS; D5: DB + 69 ppm de aceite esencial de Lippia organoides-AEO; D6: DB + 750 ppm humatos de sodio-HS.

Letras comunes A y B dentro de la misma edad de evaluación indican medias de dietas que no difieren significativamente en la prueba de Tukey ($p < 0,05$).

Los AGCC juegan diversos roles, a nivel intestinal, dentro de los cuales, se destaca su capacidad para modular el ambiente intestinal y mantener el control sobre el crecimiento de bacterias potencialmente patógenas, mediante la acidificación del pH (Azad *et al.* 2020). En correspondencia con lo encontrado, diferentes estudios reportan la acidificación del pH en yeyuno con la adición de diferentes concentraciones de FOS, lo que, a su vez, se asocia con un mayor recuento de bacterias ácido-lácticas en este segmento, como *Lactobacillus* spp. y *Bifidobacterium* spp. (Zhao & Xia, 2019).

En este sentido, estudios previos mostraron que la suplementación de 300 ppm de FOS en la dieta de los lechones durante los primeros 30 días del periodo post destete promueve la abundancia, a nivel ileal, de bacterias asociadas con la producción de metabolitos beneficiosos, como *Oscillibacter* y *Butyricoccus*, lo cual, además, se relaciona con la mejora en marcadores moleculares de salud, productividad y el desarrollo de estructuras intestinales (Ángel-Isaza *et al.* 2024).

Respecto al efecto de los aditivos nutraceutico sobre el desarrollo morfológico del intestino delgado de los lechones durante el post destete, al evaluar la longitud y el ancho de las vellosidades, a nivel de duodeno y yeyuno (Figura 3), se observaron resultados similares respecto al efecto de la dieta sobre estas dos variables, en donde, tanto al día 15 como al día 30 de evaluación, los animales

que recibieron las dietas D4 y D5 presentaron significativamente ($p < 0,05$) mayor ancho y longitud de vellosidades en los dos segmentos intestinales, en comparación con el resto de dietas, siendo, a su vez, la dieta D1, en la que los animales tuvieron un menor desarrollo de estas dos variables morfológicas.

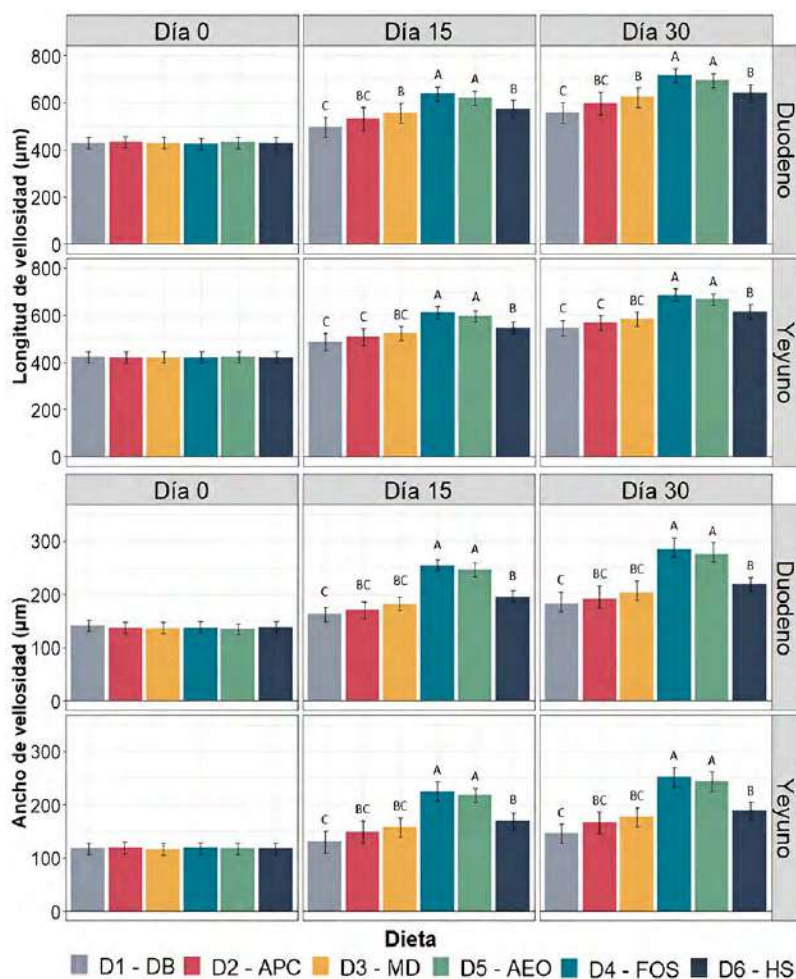


Figura 3. Efecto del uso de aditivos alimenticios sobre la longitud y el ancho de las vellosidades en duodeno y yeyuno de lechones, a los días 0, 15 y 30 del periodo post destete.

D1: Alimento balanceado sin aditivos-DB; D2: DB + 150 ppm de Bacitracina de Zinc-APC; D3: DB + 550 ppm de maltodextrina-MD; D4: DB + 300 ppm de fructooligosacarido-FOS; D5: DB + 69 ppm de aceite esencial de *Lippia organoides*-AEO; D6: DB + 750 ppm humatos de sodio-HS.

Letras comunes A, B y C dentro de la misma edad de evaluación indican medias de dietas, que no difieren significativamente en la prueba de Tukey ($p < 0,05$).

Por su parte, sobre el efecto de las dietas sobre las variables de relación V:C en duodeno y yeyuno de los lechones durante el post destete, se pudo observar que los animales que recibieron las dietas D4 y D5 presentaron el mayor desarrollo de dicha variable ($p < 0,05$), en las dos edades de evaluación, en comparación con todas las otras dietas, encontrándose que D4 y D5 presentaron, a nivel de duodeno, relaciones V:C con valores de 5,5 y 5,3 al día 15 y de 7,3 y 7,0 al día 30 post destete, lo que representa un incremento de entre el 13 al 35 % en el desarrollo de esta variable, frente a las otras dietas utilizadas en el estudio; por su parte, el incremento observado de V:C, a nivel de yeyuno, en las dietas D4 y D5, alcanzó un 31 y 27 %, con relación a la dieta D2-APC (Figura 4).

En este sentido, Reis-De Souza *et al.* (2005) reportaron que las primeras 24 horas posteriores al destete son críticas, ya que se produce una reducción en la longitud de las vellosidades, recuperándose durante la primera semana y alcanzando valores similares a los previos al proceso de destete, entre los días 9 y 14. Es importante tener en cuenta que este proceso de recuperación puede ser más prolongado, dependiendo de las condiciones y del estado de salud de los animales (Reis-De Souza *et al.* 2005; Parra Alarcón *et al.* 2022).

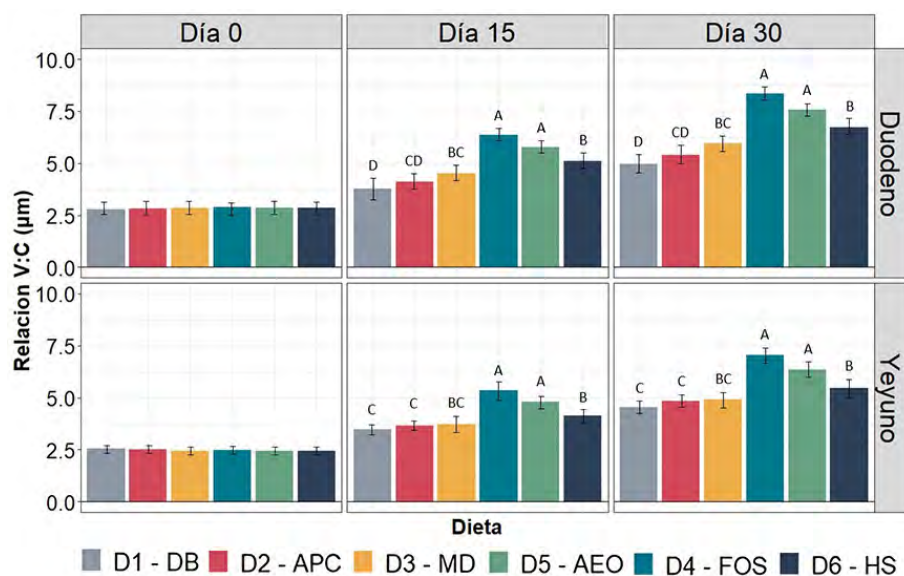


Figura 4. Efecto del uso de aditivos alimenticios sobre la relación V:C en duodeno y yeyuno de lechones, durante el periodo post destete.

D1: Alimento balanceado sin aditivos-DB; D2: DB + 150 ppm de Bacitracina de Zinc-APC; D3: DB + 550 ppm de maltodextrina- MD; D4: DB + 300 ppm de fructooligosacarido-FOS; D5: DB + 69 ppm de aceite esencial de *Lippia organoides*-AEO; D6: DB + 750 ppm humatos de sodio-HS. Letras comunes A, B C y D dentro de la misma edad de evaluación (Día) indican medias de dietas, que no difieren significativamente en la prueba de Tukey ($p < 0,05$). V:C: relación longitud de vellosidad/profundidad cripta.

Con relación al efecto de los aditivos alimenticios utilizados en el estudio, se observó que las dietas D4 y D5, que contenían FOS y AEO, estimularon, de manera más efectiva, el desarrollo de las variables morfométricas de duodeno y yeyuno. Estos hallazgos están respaldados por el estudio de Liu *et al.* (2020), donde lechones desafiados con cepas de *E. coli* enterotoxigénicas durante el destete y que recibieron suplementos de FOS mostraron una mayor relación V:C en duodeno e íleon, en comparación con los animales desafiados que no recibieron el aditivo prebiótico (Liu *et al.* 2020).

Cabe destacar que la evaluación de la relación V:C es particularmente relevante, ya que se ha demostrado que una menor longitud de las vellosidades intestinales, con relación a la profundidad de las criptas, está asociada con un menor número de células absorbentes, como, adicionalmente, se pudo observar en el presente estudio, a través de la alta correlación de dicha variable con la productividad y la disminución de la aparición de diarreas en los lechones (Nguyen *et al.* 2021). Otros estudios han reportado previamente, que la suplementación de lechones con dosis de FOS entre 1 y 2 Kg por tonelada de alimento (dosis superior a la utilizada en el presente estudio), resultó en una mejor longitud de las vellosidades y un valor de relación V:C más alto, en comparación con animales que recibieron APC (Zhao & Xia, 2019).

Respecto a los resultados obtenidos con el uso de AEO, diversas investigaciones informan sobre el efecto benéfico de los aceites esenciales y sus componentes activos, como el carvacrol y el timol sobre la integridad (morfología) y salud intestinal en cerdos, durante el periodo post destete. Consistentemente, se reporta que la suplementación con estos compuestos genera un aumento significativo en la altura de las vellosidades en diferentes segmentos del intestino delgado (Giannenas *et al.* 2016; Zou *et al.* 2016;

Cheng *et al.* 2018; Madrid-Garcés *et al.* 2018; Mohiti-Asli & Ghanaatparast-Rashti, 2018; Yang *et al.* 2018), acompañado de una reducción en la profundidad de las criptas y un incremento notable en el área superficial del epitelio intestinal (Mohiti-Asli & Ghanaatparast-Rashti, 2018). Es relevante destacar que la disminución en la profundidad de las criptas se relaciona con una menor tasa de descamación de las vellosidades, lo que conlleva una disminución en la demanda energética para la continua reparación del tejido dañado y el recambio celular subsiguiente, lo que, a su vez, mejora y optimiza los parámetros productivos (Kogut *et al.* 2017; Peng *et al.* 2016).

En contraste con resultados encontrados, en un estudio previo de Dieguez *et al.* (2022), utilizando AEO en concentraciones similares a las de esta investigación, no reportaron diferencias significativas en el pH de los diferentes segmentos del intestino delgado en lechones durante el periodo post destete; sin embargo, observó que la suplementación con el aceite esencial mejoró significativamente la altura de las vellosidades y el área de absorción intestinal. Estos hallazgos indican que el aceite esencial de *Lippia organoides* ayudó a mitigar el daño sufrido por los enterocitos durante el desafío del periodo post destete, mejorando la salud intestinal de los lechones (Dieguez *et al.* 2022).

Estudios, como los de Mo *et al.* (2022), relacionados con el uso de aceites esenciales de *L. organoides*, destacan la importancia de la capacidad bactericida directa que presenta este tipo de compuestos en su función sobre la mejora de salud intestinal de los lechones. En este sentido, esta capacidad de reducción de organismos potencialmente patógenos fue observado por Ángel-Isaza *et al.* (2024), donde el uso de 69 ppm de aceite esencial de *L. organoides* redujo la abundancia relativa del filo de las Proteobacterias,

particularmente del género *Escherichia* y *Shigella*, lo cual, podría contribuir a reducir el daño que se genera en los enterocitos, durante el periodo post destete.

En la figura 5, se evidencia que al día 30 del post destete, tanto en duodeno como en yeyuno, se observaron correlaciones estrechas entre variables morfométricas, clínicas y productivas. Al analizar la asociación entre las variables productivas, PV y CAA con las

mediciones morfométricas LV, AV, PC y V:C, se pueden apreciar una estrecha correlación con coeficientes de correlación superiores a 0,82 entre todas las variables evaluadas, donde, a nivel de duodeno, la V:C presentó el mayor nivel de correlación (-0,87) con la CAA, mientras que en el yeyuno, la AV fue la más asociada a CAA (-0,84). Respecto a la relación del ISD con las otras variables evaluadas se pudo evidenciar una estrecha relación entre la calificación fecal con las variables productivas y morfométricas.

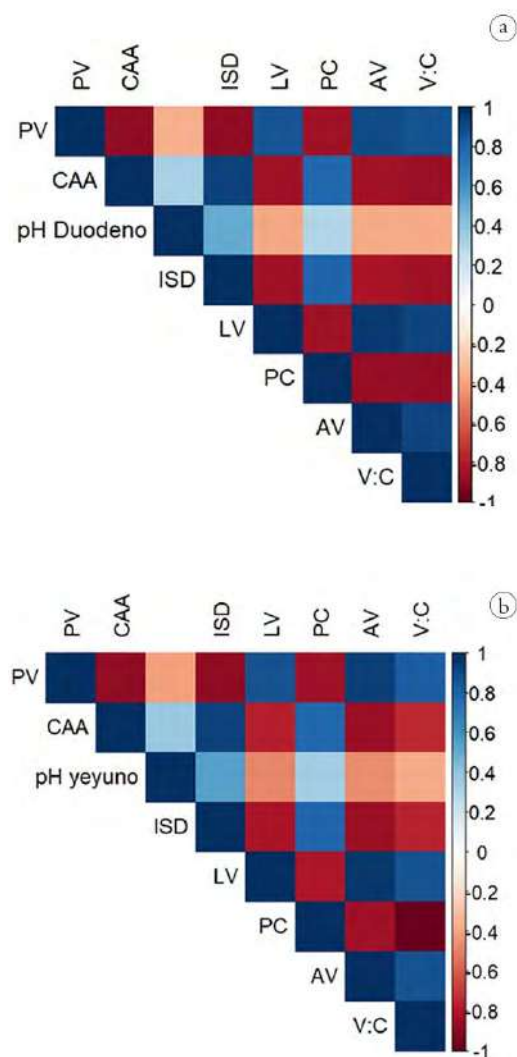


Figura 5. Correlación entre el rendimiento productivo y variables morfométricas al día 30 post destete. a) duodeno y b) yeyuno.

PV: peso vivo; CAA: Conversión alimenticia acumulada; ISD: índice de severidad de diarrea; LV: longitud de vellosidad; PC: profundidad de cripta; AV: ancho de vellosidad; V:C: relación longitud de vellosidad con profundidad de cripta.

Cuadro con color más intenso indican una mayor correlación (azul: positivo, rojo: negativo), entre variables evaluadas por correlación lineal de Pearson.

La relación observada entre las variables morfológicas del intestino delgado con la productividad de los lechones durante el post destete fue descrita por Wang *et al.* (2020), donde los animales con menor altura de vellosidades (enterocitos menos maduros), a nivel de yeyuno, presentan menor actividad de enzimas de borde de cepillo (punta de las vellosidades) y, por tanto, estos animales tienen una menor capacidad de expresar su potencial genético para el crecimiento y la producción, evidenciándose la importancia de

estimular el desarrollo de las estructuras morfológicas del intestino delgado de los lechones, durante el periodo post destete.

En conclusión, los diferentes compuestos nutracéuticos evaluados tuvieron la capacidad de promover resultados productivos similares e, incluso, superiores, en comparación con los APC, durante los 30 días del periodo post destete. Acorde con los resultados encontrados, la adición de FOS o AEO en el alimento de lechones

post destete genera mejores resultados productivos y de desarrollo intestinal en duodeno y yeyuno. Por lo anterior, los FOS y los AEO se presentan como una alternativa viable para el reemplazo de los APC durante el periodo post destete en los lechones; no obstante, se debe continuar profundizando en los mecanismos subyacente, relacionados en cómo estos compuestos contribuyen a la promoción del crecimiento de los lechones, con énfasis en los efectos asociados directamente con la mucosa intestinal, como con las comunidades microbianas intestinales.

Agradecimientos. A la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, por sus instalaciones para desarrollar este proyecto y Promitec Santander, por proveer los aditivos nutraceuticos. **Conflicto de intereses:** El investigador Jaime A. Ángel-Isaza se encuentra vinculado al área de innovación de la empresa Promitec Santander. Los autores restantes declaran que la investigación se realizó en ausencia de cualquier relación comercial o financiera que pueda interpretarse como un potencial conflicto de intereses. **Financiación:** Este estudio fue financiado por la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín y Promitec Santander. **Contribución de los autores:** conceptualización: Parra-Suescún, J., Ángel-Isaza J.; metodología: Parra-Suescún, J., Ángel-Isaza J., López-Herrera, A; análisis formal: Parra-Suescún, J., Ángel-Isaza, J.; metodología: Parra-Suescún, J., Ángel-Isaza J., López-Herrera, A., Madrid-Garcés, T., Herrera-Franco, V.; redacción y preparación del borrador original: Parra-Suescún, J., Ángel-Isaza; revisión y edición: López-Herrera, A., Madrid-Garcés T., Herrera-Franco, V.

REFERENCIAS

- ÁNGEL-ISAZA, J.A.; HERRERA FRANCO, V.; LÓPEZ-HERRERA, A.; PARRA-SUESCÚN, J.E. 2024. Nutraceutical additives modulate microbiota and gut health in post-weaned piglets. *Veterinary Sciences*. 11(8):332. <https://doi.org/10.3390/vetsci11080332>
- AZAD, M.A.K.; GAO, J.; MA, J.; LI, T.; TAN, B.; HUANG, X.; YIN, J. 2020. Opportunities of prebiotics for the intestinal health of monogastric animals. *Animal Nutrition*. 6(4):379-388. <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2020.08.001>
- BARRERA-BARRERA, H.M.; RODRÍGUEZ-GONZÁLEZ, S.P.; TORRES-VIDALES, G. 2014. Efectos de la adición de ácido cítrico y un probiótico comercial en el agua de bebida, sobre la morfometría del duodeno y parámetros zootécnicos en pollo de engorde. *Orinoquia*. 18(2):52. <https://doi.org/10.22579/20112629.306>
- CANADIAN COUNCIL ON ANIMAL CARE. 2009. Guidelines on: the care and use of farm animals in research, teaching and testing Canadian Council on Animal Care in science. Volumen 1. CCAC. Canada. 162p. Disponible desde Internet en: https://ccac.ca/Documents/Standards/Guidelines/Farm_Animals.pdf
- CHENG, C.; XIA, M.; ZHANG, X.; WANG, C.; JIANG, S.; PENG, J. 2018. Supplementing oregano essential oil in a reduced-protein diet improves growth performance and nutrient digestibility by modulating intestinal bacteria, intestinal morphology, and antioxidative capacity of growing-finishing pigs. *Animals*. 8(9):159. <https://doi.org/10.3390/ani8090159>
- CIRO GALEANO, J.A.; LÓPEZ HERRERA, A.; PARRA SUESCÚN, J. 2016. The probiotic *Enterococcus faecium* modifies the intestinal morphometric parameters in weaning piglets. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*. 69(1):7803-7811. <https://doi.org/10.15446/RFNA.V69N1.54748>
- CSERNUS, B.; CZEGLÉDI, L. 2020. Physiological, antimicrobial, intestine morphological, and immunological effects of fructooligosaccharides in pigs. *Archives Animal Breeding*. 63(2):325-335. <https://doi.org/10.5194/AAB-63-325-2020>
- DIEGUEZ, S.N.; DECUNDO, J.M.; MARTÍNEZ, G.; AMANTO, F.A.; BIANCHI, C.P.; PÉREZ GAUDIO, D.S.; SORACI, A.L. 2022. Effect of dietary oregano (*Lippia origanoides*) and clover (*Eugenia caryophyllata*) essential oils' formulations on intestinal health and performance of pigs. *Planta Medica*. 88(3-4):324-335. <https://doi.org/10.1055/a-1698-8469>
- ERIKSEN, E.Ø.; KUDIRKIENE, E.; CHRISTENSEN, A.E.; AGERLIN, M.V.; WEBER, N.R.; NØDTVEDT, A.; NIELSEN, J.P.; HARTMANN, K.T.; SKADE, L.; LARSEN, L.E.; PANKOKE, K.; OLSEN, J.E.; JENSEN, H.E.; PEDERSEN, K.S. 2021. Post-weaning diarrhea in pigs weaned without medicinal zinc: risk factors, pathogen dynamics, and association to growth rate. *Porcine Health Management*. 7(1):54. <https://doi.org/10.1186/s40813-021-00232-z>
- GIANNENAS, I.; TZORA, A.; SARAKATSIANOS, I.; KARAMOUTSIOS, A.; SKOUFOS, S.; PAPAIOANNOU, N.; ANASTASIOU, I.; SKOUFOS, I. 2016. The Effectiveness of the use of oregano and laurel essential oils in chicken feeding. *Annals of Animal Science*. 16(3). <https://doi.org/10.1515/aoas-2015-0099>
- HERRERA FRANCO, V.; PARDO CARRASCO, S.; PARRA SUESCÚN, J. 2022. Antimicrobials added to the feed of weaned piglets at two ages improves the molecular expression of intestinal barrier proteins. *Animal Production Science*. 62(6):511-520. <https://doi.org/10.1071/AN21027>

- INTERNATIONAL COUNCIL FOR LABORATORY ANIMAL SCIENCE, ICLAS. 2012. International guiding principles for biomedical research involving animals. Consejo de Organizaciones Internacionales de las Ciencias Médicas- Consejo Internacional para la Ciencia de Animales de Laboratorio. 4p. Disponible desde Internet en: https://grants.nih.gov/grants/olaw/guiding_principles_2012.pdf
- KIERNAN, D.P.; O'DOHERTY, J.V.; SWEENEY, T. 2023. The effect of prebiotic supplements on the gastrointestinal microbiota and associated health parameters in pigs. *Animals*. 13(19):3012. <https://doi.org/10.3390/ani13193012>
- KIM, S.W.; DUARTE, M.E. 2021. Understanding intestinal health in nursery pigs and the relevant nutritional strategies. *Animal Bioscience*. 34(3):338. <https://doi.org/10.5713/AB.21.0010>
- KOGUT, M.H.; YIN, X.; YUAN, J.; BROOM, L. 2017. Gut health in poultry. *CAB Reviews: Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources*. Reino Unido. <https://doi.org/10.1079/PAVSNNR201712031>
- LATA, M. 2022. Weaned pig: Influencing dietary factors for functionality of small intestine. *Vigyan Varta*. 3(1):7-11.
- LIU, L.; CHEN, D.; YU, B.; YIN, H.; HUANG, Z.; LUO, Y.; ZHENG, P.; MAO, X.; YU, J.; LUO, J.; YAN, H.; HE, J. 2020. Fructooligosaccharides improve growth performance and intestinal epithelium function in weaned pigs exposed to enterotoxigenic *Escherichia coli*. *Food & Function*. 11(11):9599-9612. <https://doi.org/10.1039/D0FO01998D>
- MADRID-GARCÉS, T.A.; LÓPEZ-HERRERA, A.; PARRA-SUESCÚN, J. 2018. La ingesta de aceite esencial de orégano (*Lippia origanoides*) mejora la morfología intestinal en Broilers. *Archivos de Zootecnia*. 66(254):287-299. <http://dx.doi.org/10.21071/az.v0i0.3876>
- MAYA-ORTEGA F.C.; ÁNGEL-ISAZA, J.A.; MARTÍNEZ-MORALES, B.C.; PARRA-SUESCÚN, J.E. 2021. Aceite esencial de orégano (*Lippia origanoides*) mejora parámetros productivos y metabolitos sanguíneos en lechones. *Biocología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*. 19(2):82-93. <https://doi.org/10.18684/bsaa.v19.n2.2021.1547>
- MO, K.; LI, J.; LIU, F.; XU, Y.; HUANG, X.; NI, H. 2022. Superiority of microencapsulated essential oils compared with common essential oils and antibiotics: effects on the intestinal health and gut microbiota of weaning piglet. *Frontiers in Nutrition*. 8:808106. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.808106>
- MOHITI-ASLI, M.; GHANAATPARAST-RASHTI, M. 2018. Comparing the effects of a combined phytogetic feed additive with an individual essential oil of oregano on intestinal morphology and microflora in broilers. *Journal of Applied Animal Research*. 46(1):184-189. <https://doi.org/10.1080/09712119.2017.1284074>
- NGUYEN, D.T.N.; LE, N.H.; PHAM, V.V.; EVA, P.; ALBERTO, F.; LE, H.T. 2021. Relationship between the ratio of villous height: crypt depth and gut bacteria counts as well production parameters in broiler chickens. *The Journal of Agriculture and Development*. 20(03):1-10. <https://doi.org/10.52997/jad.1.03.2021>
- PADILLA PÉREZ, M. 2007. Manual de porcicultura. Ministerio de Agricultura y Ganadería, San José, Costa Rica. 96p. Disponible desde Internet en: <https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/l01-9306.pdf>
- PATÍÑO F, F.; HERRERA F, V.; LÓPEZ D., D.; PARRA S., J. 2019. Metabolitos sanguíneos y parámetros zootécnicos en lechones destetados a dos edades y con adición de antimicrobianos en el alimento. *Revista de Investigaciones Veterinarias Del Peru*. 30(2):612-623. <https://doi.org/10.15381/rivep.v30i2.14887>
- PARRA ALARCÓN, E.A.; HIJUITL VALERIANO, T.D.J.; MARISCAL LANDÍN, G.; REIS-DE SOUZA, T.C. 2022. Concentrado de proteína de papa: una posible alternativa al uso de antibióticos en las dietas para lechones destetados. *Revisión. Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*. 13(2):510-524. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v13i2.5980>
- PENG, Q.Y.; LI, J.D.; LI, Z.; DUAN, Z.Y.; WU, Y.P. 2016. Effects of dietary supplementation with oregano essential oil on growth performance, carcass traits and jejunal morphology in broiler chickens. *Animal Feed Science and Technology*. 214:148-153. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2016.02.010>
- REIS-DE SOUZA, C.T.; LANDÍN, M.G.; GARCÍA, K.E. 2010. Algunos factores fisiológicos y nutricionales que afectan la incidencia de diarreas posdestete en lechones. *Veterinaria México*. 41(4):275-288.
- REIS-DE SOUZA, T.; CARRILLO G.D.J.M.; BARREYRO, A.A.; LANDÍN, G.M. 2005. Effect of different cereals on intestinal villous morphology in weaned piglets. *Técnica Pecuaria en México*. 43(3):309-321.
- ROSTAGNO, H.S. 2017. Tablas brasileñas para aves y cerdos. Cuarta edición. Departamento de Zootecnia, UFV. Brasil. 488p.
- RSTUDIO TEAM. 2020. RStudio: Integrated Development for R. RStudio, PBC. Disponible desde internet en: <https://posit.co/blog/rstudio-pbc/>

- SANTOS, T.G.; FERNANDES, S.D.; DE OLIVEIRA ARAÚJO, S.B.; FELICIONI, F.; DE MÉRICI DOMINGUES E PAULA, T.; CALDEIRA-BRANT, A.L.; FERREIRA, S.V.; DE PAULA NAVES, L.; DE SOUZA, S.P.; CAMPOS, P.H.R.F.; CHIARINI-GARCIA, H.; DIAS, A.L.N.A.; DE ALMEIDA, F.R.C.L. 2022. Intrauterine growth restriction and its impact on intestinal morphophysiology throughout postnatal development in pigs. *Scientific Reports*. 12(1):11810. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-14683-z>
- WANG, M.; YANG, C.; WANG, Q.; LI, J.; HUANG, P.; LI, Y.; DING, X.; YANG, H.; YIN, Y. 2020. The relationship between villous height and growth performance, small intestinal mucosal enzymes activities and nutrient transporters expression in weaned piglets. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*. 104(2):606-615. <https://doi.org/10.1111/JPN.13299>
- YANG, X.; XIN, H.; YANG, C.; YANG, X. 2018. Impact of essential oils and organic acids on the growth performance, digestive functions and immunity of broiler chickens. *Animal Nutrition*. 4(4):388-393. <https://doi.org/10.1016/J.ANINU.2018.04.005>
- ZHAI, H.; LIU, H.; WANG, S.; WU, J.; KLUENTER, A.M. 2018. Potential of essential oils for poultry and pigs. *Animal Nutrition*. 4(2):179-186. <https://doi.org/10.1016/J.ANINU.2018.01.005>
- ZHAO, F.; XIA, Z. 2019. Application of FOS and CPP in intestinal health of Weaned Piglets. *E3S Web of Conferences*. 131. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913101077>
- ZHENG, L.; DUARTE, M.E.; SEVAROLLI LOFTUS, A.; KIM, S.W. 2021. Intestinal health of pigs upon weaning: Challenges and nutritional intervention. *Frontiers in Veterinary Science*. 8:91. <https://doi.org/10.3389/fvets.2021.628258>
- ZOU, Y.; XIANG, Q.; WANG, J.; PENG, J.; WEI, H. 2016. Oregano essential oil improves intestinal morphology and expression of tight junction proteins associated with modulation of selected intestinal bacteria and immune status in a pig model. *BioMed Research International*. 2016(1):5436738. <https://doi.org/10.1155/2016/5436738>



Diseño de medios de cultivo para el crecimiento de *Lactobacillus pentosus* LB-31 como probiótico para la producción animal

Design of culture media for the growth of *Lactobacillus pentosus* LB-31 as a probiotic for animal production

Dailyn Sosa-Cossio^{1*} ; Yaneisy García-Hernández¹ ; Julio C. Dustet-Mendoza² ; Maryen Alberto Vázquez³ ; Nereyda Albelo-Dorta³ ; Dania Ortega-de-la-Paz³

¹Instituto de Ciencia Animal, Grupo de Alimentos y Aditivos. Mayabeque, Cuba; email: dailyn.sosa@gmail.com; yaneisyg@gmail.com

²Universidad Tecnológica de la Habana "José Antonio Echeverría", Facultad de Ingeniería Química. La Habana, Cuba; email: jcdm@quimica.cujae.edu.cu

³Instituto de Ciencia Animal, Unidad Central de Laboratorios. Mayabeque, Cuba; email: maryne4e@gmail.com; nereydaalbelo@gmail.com; danyfaby2607@gmail.com

*autor para correspondencia: dailyn.sosa@gmail.com

Cómo citar: Sosa-Cossio, D.; García-Hernández, Y.; Dustet-Mendoza, J.C.; Vázquez, M.A.; Albelo-Dorta, N.; Ortega-de-la-Paz, D. 2025. Diseño de medios de cultivo para el crecimiento de *Lactobacillus pentosus* LB-31 como probiótico para la producción animal. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 28(1):e2644. <http://doi.org/10.31910/rudca.v28.n1.2025.2644>

Artículo de acceso abierto publicado por Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, bajo una Licencia Creative Commons CC BY-NC 4.0

Publicación oficial de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Institución de Educación Superior Acreditada en Alta Calidad por el Ministerio de Educación Nacional

Recibido: abril 26 de 2024

Aceptado: junio 3 de 2025

Editado por: Helber Adrián Arévalo Maldonado

RESUMEN

El diseño de medios de cultivo simples y económicos es uno de los aspectos más importantes para el proceso de obtención de probióticos a escalas industriales. El objetivo de la presente investigación fue diseñar medios de cultivo económicos para el crecimiento de *Lactobacillus pentosus* LB-31. Se diseñaron cinco medios (M2, M3, M4, M5 y M6), a partir de la composición del medio tradicional MRS para el crecimiento de lactobacilos, donde se sustituyeron las fuentes de carbono y de nitrógeno por melaza de caña y urea, respectivamente. Las cinéticas de crecimiento se realizaron a 37 °C durante 24 h y se determinó concentración microbiana, pH, velocidad específica máxima de crecimiento, tiempo de duplicación de la biomasa, concentración máxima de biomasa y concentraciones de ácido láctico, acético y fórmico. Los resultados mostraron que LB-31 tuvo su mayor concentración a las 12 h, con 8,72 log ufc/mL, en el medio M4, sin diferencias con el medio control. Las velocidades específicas máximas de crecimiento fueron inferiores en todos los medios con respecto al control y, consecuentemente, el tiempo de duplicación de la biomasa fue superior. El pH disminuyó en todos los medios hasta valores inferiores a 3,9 y LB-31 fue capaz de producir ácido láctico, acético y fórmico en el medio M4 (6,61, 2,51 y 14,87 g/L, respectivamente). Se concluye que los medios de cultivo con melaza de caña de azúcar pueden ser una alternativa económica para la obtención del probiótico con *Lactobacillus pentosus* LB-31.

Palabras clave: Ácido acético; Ácido fórmico; Ácido láctico; Crecimiento microbiano; Melaza de caña de azúcar.

ABSTRACT

Designing economical and straightforward culture media is one of the most essential aspects to obtaining probiotics at industrial scales. This research aimed to design economical culture media for the growth of *Lactobacillus pentosus* LB-31. Five media (M2, M3, M4, M5 and M6) were designed based on the composition of the traditional MRS medium for the growth of lactobacilli where the carbon and nitrogen sources were replaced by cane molasses and urea, respectively. Growth kinetics were carried out at 37 °C for 24 h, and microbial concentration, pH, maximum specific growth rate, biomass doubling time, maximum biomass concentration, and lactic, acetic, and formic acid concentrations were determined. The results showed that LB-31 had its highest concentration at 12 h with 8.72 log cfu/mL in the M4 medium, with no differences from the control medium. The maximum specific growth rates were lower in all media than in the control, and the biomass doubling time was higher. The pH decreased in all media to values lower than 3.9, and LB-31 was able to produce lactic, acetic, and formic acid in M4 medium (6.61, 2.51, and 14.87 g/L, respectively). It is concluded that culture media with sugar cane molasses could be an economical alternative to obtain the probiotic with *Lactobacillus pentosus* LB-31.

Keywords: Acetic acid; Formic acid; Lactic acid; Microbial growth; Sugar cane molasses.

INTRODUCCIÓN

En la obtención industrial de probióticos uno de los aspectos de mayor interés es el medio de cultivo, ya que este debe ser lo más simple y económico posible (Fenster *et al.* 2019). Generalmente, estos se consideran apropiados cuando incluyen extracto de levadura, péptidos, azúcares y magnesio y manganeso en concentraciones óptimas. Además, se deben tener en cuenta los requerimientos nutricionales de la cepa de interés (Vera Mejía *et al.* 2021).

Tradicionalmente, el medio De Man, Rogosa y Sharpe (MRS pH 6,2±0,2), diseñado por De Man *et al.* (1960), se utiliza para el crecimiento de bacterias ácido láctica a escala de laboratorio. Este medio puede ser más selectivo si se disminuye el pH, se reemplaza la fuente de carbono y nitrógeno o se realizan cambios en las condiciones de incubación (Santos *et al.* 2016). Otro medio para el cultivo de *Lactobacillus* fue el propuesto por Rogosa *et al.* (1951), el cual, posee mayor acidez (pH 5,4±0,2), debido a la presencia de altas concentraciones de acetato de sodio (Reuter, 1985).

Los medios mencionados con anterioridad se usan ampliamente para el crecimiento de cepas probióticas en el laboratorio. Varias investigaciones en esta etapa se centran en optimizar cada componente y sus concentraciones, según la cepa en estudio; sin embargo, la mayoría de ellos son muy complejos por lo que no es factible su utilización, a escala industrial.

Para el diseño y selección de medios de cultivo se deben considerar factores, como el método de fermentación, la obtención de un gran número de células y los costos (Santos *et al.* 2016). Se plantea que el costo del medio de cultivo es, aproximadamente, el 30 % del costo total del proceso de fermentación (Rodrigues *et al.* 2006).

Al tener en cuenta los aspectos anteriores es necesario explorar fuentes de nutrientes económicas para la producción de biomasa probiótica, a escalas industriales (Chin *et al.* 2024); entre estas, se encuentran el uso de residuos agroindustriales, ya que suministra fuentes de carbono y nitrógeno que permiten disminuir los costos de producción, además de utilizar desechos que pudieran tener un efecto negativo para el medio ambiente.

La melaza de caña de azúcar, el salvado de trigo y arroz, el bagazo de caña de azúcar o yuca, los materiales vegetales lignocelulósicos y los residuos de cosechas de frutas son los subproductos agroindustriales más utilizados para la preparación de medios de cultivo (Santos *et al.* 2016). En este sentido, Pyar *et al.* (2014) utilizaron residuos de piña como medios de fermentación, para cultivar cepas probióticas de lactobacilos. Asimismo, Romero-Mota *et al.* (2023) emplearon estiércol bovino y melaza de caña para producir biomasa probiótica y ácido láctico, a partir de cepas de *Lactobacillus acidophilus*, *Lactobacillus fermentum* y *Bacillus subtilis*, mientras que Wan Mansor *et al.* (2024) investigaron las potencialidades de *Lactobacillus plantarum* ATCC8014 y *Lactobacillus casei* Shirota, para fermentar el jugo de caña roja y obtener una bebida probiótica funcional.

García-Hernández *et al.* (2016) seleccionaron a *Lactobacillus pentosus* LB-31 con potencialidades probióticas para su uso en la producción animal. Su efecto positivo se demostró en pollos de ceba (García-Hernández *et al.* 2016), truchas arco iris (García Hernández & Pérez Sánchez, 2015), cerdos en crecimiento (Ayala *et al.* 2014) y corderos pelibuey (Gutiérrez González *et al.* 2020); sin embargo, hasta la fecha, las investigaciones con este microorganismo estuvieron encaminadas a demostrar las potencialidades de la cepa, sin tener en cuenta el proceso de obtención del aditivo, a escalas productivas, que permita su posterior comercialización y empleo en los sistemas de producción animal.

Por lo tanto, el objetivo del presente estudio fue diseñar un medio de cultivo económico para el crecimiento de *Lactobacillus pentosus* LB-31, como probiótico para la producción animal.

MATERIALES Y MÉTODOS

Microorganismo: se utilizó la cepa *Lactobacillus pentosus* LB-31, con número de acceso FR717464 en el GenBank (García-Hernández *et al.* 2016) y perteneciente al Banco de Microorganismos para la Producción Animal (BAMIPA) del Instituto de Ciencia Animal (Mayabeque, Cuba). La cepa conservada por congelación (-70 °C) en medio LEL (leche extracto de levadura) y glicerol (20 %, v/v), se activó mediante dos subcultivos en Erlenmeyer con 30 mL de caldo MRS (Oxoid, UK), a 37 °C, en condiciones estáticas y 18-24 h de incubación.

Medios de cultivos: se evaluaron cinco medios de cultivo (M2, M3, M4, M5 y M6), que se diseñaron a partir de la composición del medio MRS (De Man *et al.* 1960), donde se sustituyeron las fuentes de carbono y nitrógeno por melaza de caña de azúcar y urea. La melaza utilizada contiene un 60 % de azúcares reductores totales; 59,79 % de materia seca y 11,13 % de cenizas. Las composiciones de todos los medios se muestran en la tabla 1 y se utilizó el medio MRS como control.

Fermentación: se utilizaron Erlenmeyer con 45 mL de medio de cultivo (100 mL de capacidad total), que se inocularon al 10 % (v/v) y se incubaron a 37 °C sin agitación. Se realizaron diluciones seriadas y siembras del cultivo en placas Petri con agar Rogosa en todos los horarios de muestreo, las que se incubaron de 24-48 h, para determinar crecimiento microbiano, a través del conteo visual de las colonias (ufc/mL). Además, se determinó la concentración máxima de biomasa, la velocidad específica máxima de crecimiento ($\mu_{m\acute{a}x}$) por regresión lineal del $\ln$ ufc/mL vs tiempo y se calculó el tiempo de duplicación de la biomasa (t_d), de acuerdo con la ecuación 1.

$$t_d = \frac{\ln 2}{\mu_{m\acute{a}x}} \quad \text{ecuación 1}$$

Se realizó un balance estequiométrico del medio de cultivo, donde el crecimiento de la cepa LB-31 fue similar al medio control, ya que los medios se diseñaron variando los componentes y no las concentraciones de cada uno de ellos. A través del rendimiento biomasa/sustrato (ecuación 2), se determinó la cantidad necesaria de fuente de carbono

en el medio de cultivo; el resto de los componentes se calcularon por balance de masa (ecuación 3). Se ajustó un modelo por regresión no lineal, que relaciona el peso seco de la biomasa de LB-31 con las ufc/mL, para determinar la concentración microbiana en g/L. Se utilizó la composición elemental promedio de un microorganismo (CH_{1,79}O_{0,50}N_{0,20}), reportado por Doran (2013), con una desviación estándar del 3 %.

$$Y_{X/S} = \frac{X_f - X_0}{S_0 - S_f}$$

ecuación 2

Donde: $Y_{X/S}$ es el rendimiento biomasa/sustrato, X_f - X_0 las concentraciones finales e iniciales de biomasa, S_0 - S_f las concentraciones iniciales y finales sustrato.

$$m_i^0 = w_i \cdot m_x$$

ecuación 3

Donde: m_i^0 la masa inicial del elemento i en el medio de cultivo, w_i la fracción másica del elemento i en la célula y m_x la masa celular.

Tabla 1. Composición de los medios de cultivo diseñados para el crecimiento de *Lactobacillus pentosus* LB-31.

Componentes	Medios de cultivo					
	MRS	M2	M3	M4	M5	M6
Glucosa (g/L)	20	-	-	-	-	-
Melaza de caña de azúcar con 60 % ART(g/L)	-	20	20	20	20	20
Peptona (g/L)	10	-	-	-	-	-
Extracto de carne (g/L)	8	-	-	-	-	-
Extracto de levadura (g/L)	4	-	-	-	-	-
Urea (g/L)	-	10	10	10	10	-
Acetato de Sodio (g/L)	5	5	-	5	-	-
Citrato de amonio (g/L)	2	2	-	2	-	-
K ₂ HPO ₄ (g/L)	2	2	2	-	-	-
MgSO ₄ ·7H ₂ O (g/L)	0,2	0,2	0,2	-	-	-
Mn SO ₄ ·H ₂ O (g/L)	0,08	0,08	0,08	-	-	-
Tween 80 (mL/L)	1	-	-	-	-	-

ART: azúcares reductores totales.

El pH se monitoreó en pHmetro digital (Sartorius, Alemania) de precisión ±0,01 unidades en todos los medios diseñados. Se determinó ácido láctico, fórmico y acético en el medio MRS y el medio, donde LB-31 tuvo un crecimiento similar al control. Para los dos primeros ácidos se utilizó cromatografía líquida de alta eficacia (HPLC por sus siglas en inglés), en un equipo YL-9100 (Korea, 2011). Se trabajó a 25 °C en una columna Teknokroma Tracer Excel 120 ODBS 5 µm (25x0,4). Como fase móvil se empleó una solución tamponada de fosfato de potasio (10 mmol/L, pH 3,0) y acetonitrilo de calidad HPLC (Merck), a relación de 95:5 % (v/v). El volumen de inyección fue de 20 µL y el flujo de 0,5 mL/min. Se utilizó una longitud de onda de 210 nm para monitorear el eluyente y se emplearon estándares de ácido láctico y fórmico (Sigma Aldrich, USA). Previamente, las muestras del cultivo de 16-20 h de fermentación se colocaron en centrífuga a 14 000 min⁻¹ (Centrifuga ECEN-205, MRC Ltd., Hagsvish, Israel), se filtraron al vacío con membrana de nitrocelulosa (sistema Milliporo 0,45 µm, Irlanda) y se realizaron las diluciones correspondientes. Los datos cromatográficos se analizaron y procesaron mediante el software YL-Clarity Chromatograph Data System.

La concentración de ácido acético se determinó mediante cromatografía de gases con un equipo DANI Master GC (DANI

Instruments S.p.A, Milán, Italia), equipado con un detector FID y una columna capilar DN-FFAP de longitud 30 m, diámetro interno 0,32 mm y grosor de película 0,25 µ. Las temperaturas máximas del inyector y el detector fueron de 200 y 250 °C, respectivamente. Se empleó dihidrógeno como gas portador y dinitrógeno, como auxiliar. Las muestras se centrifugaron a 14 000 min⁻¹ durante cinco minutos y luego se inyectaron 0,5 µL de cada una.

Diseño y tratamientos experimentales. La comparación entre cada medio diseñado y el medio MRS (control) para las cinéticas de crecimiento de la cepa y el comportamiento del pH se realizó por triplicado, a través de un diseño completamente aleatorizado con arreglo factorial (2x10). En cada caso, los factores fueron los medios de cultivo (medio diseñado y medio MRS) y el tiempo (0, 2, 3, 4, 8, 12, 16, 18, 20 y 24 h). Para comparar los parámetros de crecimiento de LB-31 en los diferentes medios se utilizó un diseño completamente aleatorizado.

Análisis estadístico. Los datos experimentales se analizaron con el paquete estadístico Infostat (Di Rienzo *et al.* 2012). Se utilizó la dócima de Duncan (1955), en los casos necesarios para discriminar diferencias entre medias a p<0,05.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la figura 1, se muestran las cinéticas de crecimiento de *Lactobacillus pentosus* LB-31 en cada medio diseñado y comparado con el medio control (MRS). Se presentó interacción entre los factores estudiados y se observa que en los cinco medios se definen todas las fases del crecimiento microbiano. En el caso del cultivo en caldo MRS, la fase de adaptación de la cepa fue de 2 h y se obtuvo la mayor concentración a las 8 h de fermentación, con valor de 8,81 ufc/mL (incremento de dos ciclos exponenciales) y, a partir de este tiempo, comenzó la fase estacionaria. Respecto a este medio, la fase de adaptación del lactobacilo fue igual en los medios M3 y M5; en M2 y M4 se extendió hasta las 3 y 4 h de fermentación, respectivamente, mientras que en el medio M6, no estuvo presente. Se debe señalar que, para lograr altas productividades en las fermentaciones industriales, la etapa de adaptación debe ser lo más corta posible.

El tiempo de fermentación máximo en cada uno de los medios (figura 1) fue de 6 h, para los medios M3 y M6; 8 h, para M2 y M5 y de 12 h, para M4. A partir de estos tiempos comenzó la fase estacionaria en todos los medios y se extendió hasta las 24 h, excepto en M6, donde el crecimiento disminuyó a las 24 h. En este último caso, el medio M6 fue el más simple (solo contiene melaza) y donde es el único que evidencia la muerte celular, quizás por el posible agotamiento de las reservas energéticas de LB-31 o el de cualquier otro elemento, indispensable para su crecimiento o mantenimiento. Las diferencias en los tiempos de duración de cada fase del crecimiento de la bacteria se pueden deber a la composición de los medios, ya que los lactobacilos tienen requerimientos nutricionales complejos (Mozzi, 2016). Asimismo, Jurado-Gómez *et al.* (2014) señalaron que las cinéticas de crecimiento también dependen del tipo de cepa probiótica, concentración de inóculo, tiempo y condiciones de cultivo.

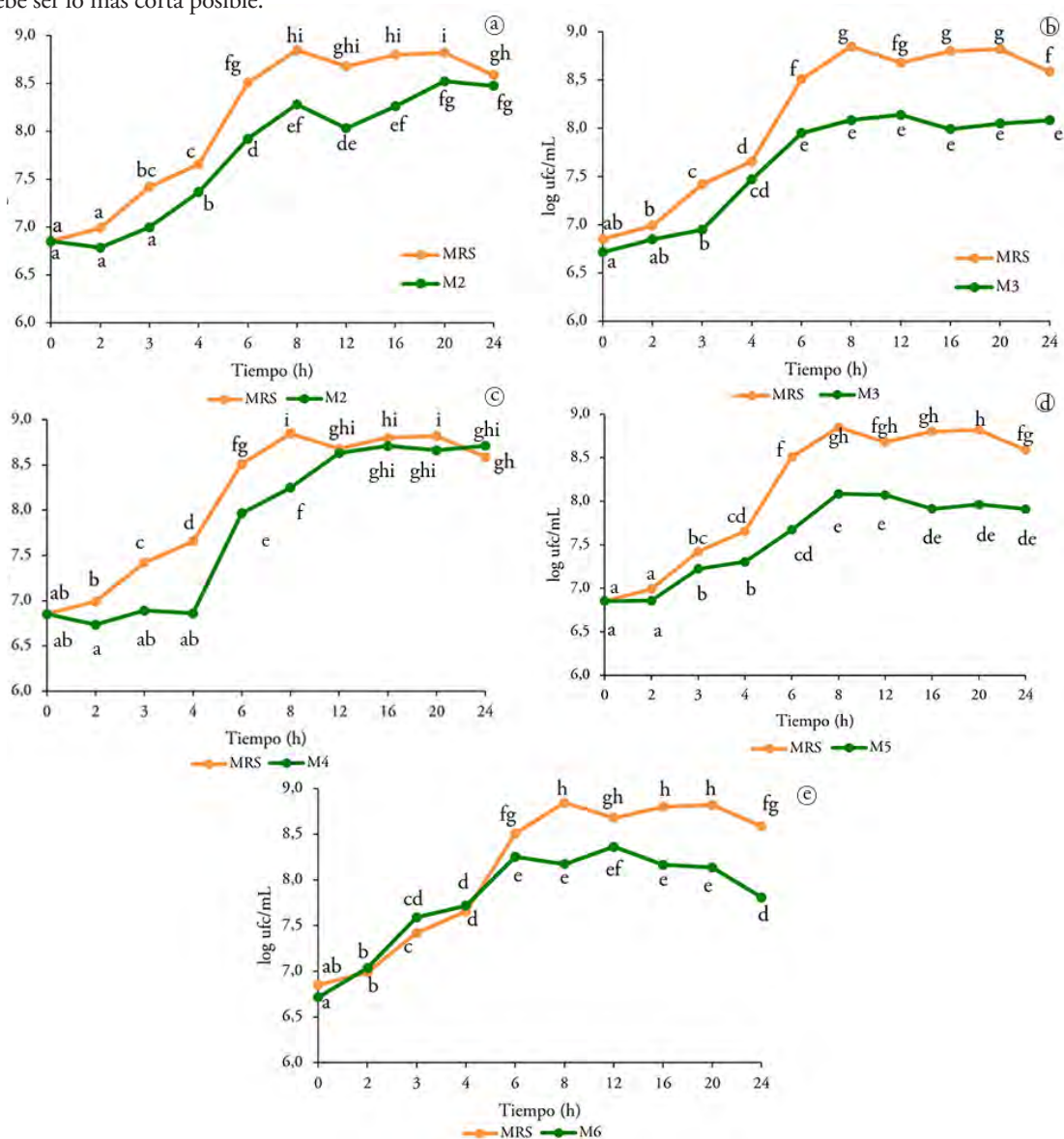


Figura 1. Cinética de crecimiento de *Lactobacillus pentosus* LB-31 en los medios M2 ($EE \pm 0,08$; $p = 0,0033$), M3 ($EE \pm 0,07$; $p < 0,0001$), M4 ($EE \pm 0,08$; $p < 0,0001$), M5 ($EE \pm 0,09$; $p < 0,0001$) y M6 ($EE \pm 0,08$; $p < 0,0001$), cada uno comparado con el medio control (MRS), a 37 °C, durante 24 h. a) MRS vs. M2; b) MRS vs. M3; c) MRS vs. M4; d) MRS vs. M5; e) MRS vs. M6.

Las letras en el gráfico indican diferencias estadísticas a $p < 0,05$.

Se debe destacar que, respecto al control, LB-31 tuvo su mayor concentración en M4, con valor de 8,72 log ufc/mL (incremento de dos ciclos exponenciales). Este medio, además de las fuentes de carbono y nitrógeno, contiene acetato de sodio y citrato de amonio, que parecen tener un papel fundamental en el crecimiento de la cepa en estudio. Chiang *et al.* (2015) demostraron que el acetato de sodio promueve el crecimiento de cepas probióticas de *Lactobacillus johnsonii* y *Lactobacillus mucosae*, mientras que Zayed & Winter (1995) recomiendan incorporar sales de amonio en el medio, ya que pueden aumentar el rendimiento de la biomasa. Además, el uso de citrato, como ingrediente, podría resultar en un aumento de la velocidad específica de crecimiento, según Amrane & Prigent (1998).

Los resultados anteriores tienen relación con varios estudios donde utilizaron la melaza de caña de azúcar para el crecimiento de diferentes tipos de microorganismos probióticos; entre ellos, se encuentran los reportes de Montes *et al.* (2003), quienes diseñaron un medio elaborado con melaza y leche en polvo, reportando el máximo crecimiento de *Lactobacillus casei* subsp. *rhamnosus* a las 11 h, con valor de $9,3 \times 10^{11}$ ufc/mL. Asimismo, Ossa *et al.* (2010) y Vera Mejía *et al.* (2021) evaluaron la melaza en la misma concentración que el presente estudio, para obtener biomasa de diferentes cepas de *Lactobacillus plantarum* y alcanzaron concentraciones de 10^{10} y 10^{12} ufc/mL, respectivamente.

Por su parte, Acosta-Piantini *et al.* (2023) utilizaron la melaza de caña de azúcar pretratada como medio de fermentación para producir biomasa de la cepa probiótica *Lactobacillus paracasei* ssp. *paracasei* F19 (LPPF19), encontrando una viabilidad celular de

$9,58 \log \text{ ufc/mL}$ y demostraron que es un medio económico para producir este microorganismo, a escalas productivas. Chin *et al.* (2024) también obtuvieron altas concentraciones de una cepa de *Lactobacillus acidophilus* en un medio optimizado, a base de melaza de caña y de extracto de levadura.

Todas las investigaciones anteriores evidencian que la melaza de caña de azúcar favorece el crecimiento de bacterias ácido lácticas, ya que es rica en azúcares fermentables, vitaminas y minerales. Esta composición no solo le permite sustituir la fuente de carbono en medios tradicionales, sino, también, otros componentes necesarios, como por ejemplo, algunos aminoácidos; sin embargo, Coelho *et al.* (2011) plantearon que se debe tener en cuenta que su composición puede ser muy variable porque depende de la madurez de la caña de azúcar, la cantidad de azúcar extraída y el método de extracción.

La tabla 2 muestra los parámetros de crecimiento de *L. pentosus* LB-31 en los medios evaluados. En todos los casos, la cepa mostró elevada velocidad específica máxima de crecimiento, aunque fue menor en los medios diseñados respecto al control, excepto para el M3. Estas diferencias se pudieran deber a que la fuente de carbono presente en el MRS es la glucosa que es de más fácil fermentación que la sacarosa, disponible en la melaza de caña de azúcar. Consecuentemente, el tiempo de duplicación de la biomasa fue superior en los medios donde la velocidad específica máxima fue inferior. Respecto a la concentración máxima de biomasa, LB-31 alcanzó valores superiores a 10^8 ufc/mL en todos los medios (incrementos de dos ciclos exponenciales), sin diferencias entre el MRS y M4.

Tabla 2. Parámetros de crecimiento de *Lactobacillus pentosus* LB-31 en los medios de cultivo diseñados.

	MRS	M2	M3	M4	M5	M6	±EE Sign
Fase exponencial (h)	2-8	3-8	2-6	4-12	2-8	0-6	
$\mu_{\text{máx}}$ (h ⁻¹)	0,73 ^d	0,59 ^{bc}	0,64 ^{cd}	0,48 ^{ab}	0,45 ^a	0,59 ^{bc}	0,04 p=0,0015
t_d (h)	0,95 ^a	1,19 ^{ab}	1,10 ^a	1,48 ^{bc}	1,57 ^c	1,18 ^{ab}	0,10 p=0,0070
$\log X_{\text{máx}}$ ($X_{\text{máx}} \cdot 10^8 \text{ ufc/mL}$)	8,80 ^e (6,47)	8,52 ^{cd} (4,52)	8,14 ^{ab} (1,45)	8,71 ^{de} (5,22)	8,08 ^a (1,25)	8,36 ^{bc} (2,33)	0,08 p=0,0002

Las letras indican diferencias estadísticas a $p < 0,05$.

Los resultados anteriores coinciden con estudios informados para otras cepas de lactobacilos, que son microorganismos que tienen altas velocidades específicas de crecimiento y el tiempo de duplicación de la biomasa se encuentra entre 0,5-1,5 h, en condiciones óptimas (Sosa Cossio *et al.* 2018). En este sentido, Jurado-Gámez *et al.* (2013) obtuvieron una velocidad específica máxima de crecimiento de $0,65 \text{ h}^{-1}$ para *Lactobacillus plantarum* 1 H2, mientras que James *et al.* (2017) lograron valores de $0,78$ y $0,31 \text{ h}^{-1}$, para *Lactobacillus acidophilus* y *Lactobacillus casei*, respectivamente.

Una de las características deseadas en la selección de microorganismos probióticos es que presenten altas velocidades de crecimiento en condiciones óptimas para que tengan mayores probabilidades de colonizar el tracto gastrointestinal y se puedan duplicar rápidamente (Rojas Mogollón *et al.* 2021). Los resultados que se presentan para LB-31 en los medios de cultivo diseñados (concentraciones mayores a 10^8 ufc/mL y alta velocidad de crecimiento) permiten ratificar sus potencialidades probióticas y son comparables con otros estudios de especies y cepas de bacterias ácido lácticas.

Las investigaciones encaminadas al diseño de medios de cultivo que alcancen elevadas concentraciones microbianas ($>10^7$ ufc/mL) son elementos importantes en el desarrollo de bacterias lácticas como probióticos. A nivel industrial, la obtención de biomasa probiótica se caracteriza por la inhibición del crecimiento celular, debido a la disminución del pH, fundamentalmente, por la producción de ácido láctico.

El comportamiento del pH durante el crecimiento de LB-31 se presenta en la figura 2. Después de la inoculación, esta variable

disminuyó entre tratamientos, debido a la composición de los medios de cultivo. En los casos donde se incluyó la urea, los valores estuvieron por encima de 7,0, debido a que este compuesto posee carácter básico; no obstante, durante el crecimiento de la bacteria, el pH de todos los medios disminuyó en 24 h hasta valores inferiores a 3,9. En este sentido, Sawatari & Yokota (2007) demostraron que cepas de *Lactobacillus plantarum* y *Lactobacillus pentosus* pueden crecer en pH de 8,2-8,7.

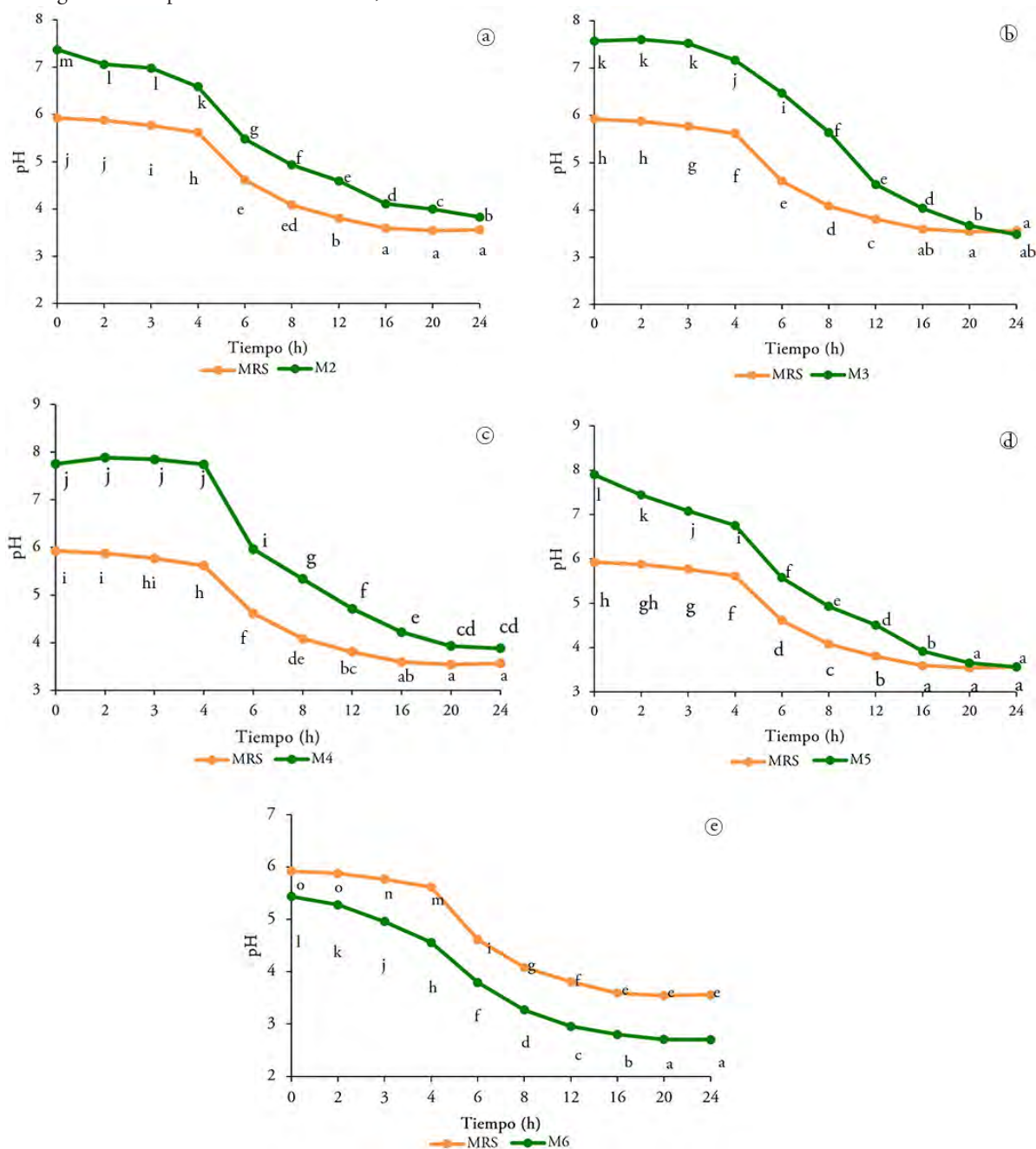


Figura 2. Comportamiento del pH del cultivo de *Lactobacillus pentosus* LB-31 en los medios M2 ($EE \pm 0,08$; $p = 0,0033$), M3 ($EE \pm 0,04$; $p < 0,0001$), M4 ($EE \pm 0,08$; $p < 0,0001$), M5 ($EE \pm 0,09$; $p < 0,0001$) y M6 ($EE \pm 0,02$; $p < 0,0001$), cada uno comparado con el medio control (MRS), a 37 °C, durante 24 h. a) MRS vs. M2; b) MRS vs. M3; c) MRS vs. M4; d) MRS vs. M5; MRS vs. M6.

Las letras en el gráfico indican diferencias estadísticas a $p < 0,05$.

Al tener en cuenta todos los resultados anteriores se puede plantear que el medio M4 es la mejor opción para la producción de LB-31 como probiótico en la alimentación animal. En este caso, además de ser uno de los medios donde se obtuvieron los mejores parámetros de crecimiento, incluye menos componentes en su preparación, comparado con los medios M2 y M3, lo que tiene ventajas tecnológicas y económicas para la obtención del probiótico, a escalas productivas. En este sentido, se evidencia que la urea favoreció el crecimiento de LB-31, debido, fundamentalmente, a la naturaleza de esta fuente, donde el nitrógeno no proteico es de más fácil aprovechamiento por la bacteria. Además, los requerimientos nutricionales de los microorganismos pueden variar según la cepa y especie microbiana. La posibilidad de utilizar la urea en el medio de cultivo ofrece beneficios económicos, ya que es una fuente menos costosa (Sánchez *et al.* 2007), en comparación con otras fuentes de nitrógeno, como el extracto de levadura, que se utilizan en las fermentaciones industriales (Benaissa *et al.* 2017; Wang *et al.* 2020).

A pesar de las ventajas que tiene la urea como fuente de nitrógeno en el crecimiento de *L. pentosus* LB-31 es recomendable ajustar y controlar el pH dentro del intervalo óptimo para bacterias ácido lácticas, ya que se conoce que uno de los mayores inconvenientes

para la obtención de biomasa probiótica, a escalas productivas, es la inhibición del crecimiento celular, debido a la producción de ácidos.

Las bacterias ácido lácticas crecen adecuadamente en medios ligeramente ácidos y algunas de ellas son capaces de mantener su viabilidad, a valores muy bajos de pH. Esta característica les permite sobrevivir al ambiente del tracto gastrointestinal, donde predomina pH ácido y altas concentraciones de sales biliares. La tabla 3 muestra las concentraciones de ácidos que produce LB-31 durante su crecimiento en los medios MRS y M4. Se aprecia que la bacteria produjo ácido láctico, acético y fórmico en los dos medios de cultivo y que los valores de las concentraciones fueron superiores en el MRS. Los resultados indican que el metabolismo de LB-31 puede variar en función del medio que se utilice para su crecimiento y ratifican que es una bacteria heterofermentativa facultativa, según lo planteado por Bintsis (2018). De forma general, las bacterias ácido lácticas son altas productoras de ácido, fundamentalmente, láctico. En este sentido, Saavedra *et al.* (2021) obtuvieron altas concentraciones de ácido láctico a partir del crecimiento de *Lactobacillus plantarum* Hui1, en un medio con melaza de caña de azúcar.

Tabla 3. Concentraciones de ácidos que produce *Lactobacillus pentosus* LB-31 en medio MRS y M4 entre las 16-20 h a 37 °C.

Ácidos	Concentración (g/L)		±EE Sign
	MRS	M4	
Ácido láctico	11,77	6,61	1,16 p=0,0348
Ácido acético	3,97	2,51	0,04 p<0,0001
Ácido fórmico	16,85	14,87	0,38 p=0,0203

Los resultados de la presente investigación sugieren que el medio de cultivo diseñado cubre las necesidades nutricionales de la cepa al utilizar los nutrientes presentes en la melaza, así como el nitrógeno que aporta la urea. En este caso, el balance estequiométrico indicó que un litro de medio de cultivo debe contener 6,26 g de azúcares reductores totales (10,4 g/L de melaza de caña), 0,37 g de urea, 1 g de citrato de amonio y 0,056 g de acetato de sodio, para producir la mayor concentración de LB-31 alcanzada en este estudio, que fue de $5,22 \times 10^8$ ufc/mL (1,57 g biomasa seca/L). De ahí, que el medio M4 tiene potencialidades para obtener 3 g biomasa seca/L (10^{10} ufc/mL) de LB-31, por lo que no existe limitación de nutrientes; no obstante, la concentración microbiana solo aumentó de 10^6 a 10^8 ufc/mL (incremento de dos ciclos exponenciales), debido, quizás, al metabolismo característico de la cepa que es, además de la obtención de biomasa, la producción de diferentes ácidos orgánicos. Escobar-Ramírez *et al.* (2020), también obtuvieron aumentos en dos ciclos exponenciales de la concentración microbiana de *L. pentosus* ABHEAU-05, cultivado en una solución de leche desnatada en polvo al 12 % (p/v) y 2 % de inulina (E NATURE®), a 37 °C y 28 h.

Diferentes autores coinciden en que el medio de cultivo tradicional para el crecimiento de lactobacilos (MRS) es eficaz, a escala de laboratorio, pero muy costoso para producciones industriales (Hanoune *et al.* 2015; Santos *et al.* 2016; Benaissa *et al.* 2017). También, Grattepanche & Lacroix (2013) señalaron entre otras desventajas, su complejidad y la presencia de compuestos de origen animal, como el extracto de carne. El medio de cultivo M4, propuesto en el presente estudio, tiene beneficios económicos para el proceso de obtención del aditivo con *L. pentosus* LB-31, a escalas productivas y esto se debe a que la melaza es un subproducto de la industria azucarera que tiene un costo menor que la glucosa. Además, tiene una composición simple comparada con otras, que se informan en la literatura, para el crecimiento de cepas de *Lactobacillus*, lo que constituye un aspecto necesario en las fermentaciones industriales.

Por lo tanto, se puede concluir, que los medios de cultivo con melaza de caña de azúcar pudieran ser una alternativa económica para la obtención de probióticos, a escalas productivas. El medio M4 es la opción más adecuada para la obtención de *L. pentosus* LB-31 como aditivo probiótico, destinado a la producción animal.

Agradecimientos: Los autores agradecen la colaboración de la Unidad Central de Laboratorios del Instituto de Ciencia Animal, Mayabeque, Cuba. **Conflicto de intereses:** Los autores declaran que no existen conflicto de intereses entre ellos. **Financiamiento:** Las investigaciones se realizaron con recursos propios del Grupo de Alimentos y Aditivos del Instituto de Ciencia Animal, Mayabeque, Cuba. **Contribución de los autores:** Dailyn Sosa Cossio: conceptualización, investigación, metodología, redacción-borrador original; Yaneisy García Hernández: conceptualización, investigación, metodología, redacción-revisión y edición; Julio C. Dustet Mendoza: conceptualización, redacción-revisión y edición; Maryen Alberto Vázquez: investigación, metodología; Nereyda Albelo Dorta: investigación, curación de datos; Dania Ortega de la Paz: metodología, análisis formal.

REFERENCIAS

- ACOSTA-PIANTINI, E.; RODRÍGUEZ-DÍEZ, E.; CHAVARRI, M.; LÓPEZ-DE-ARMENTIA, I.; VILLARAN, M.C.; LOMBRAÑA, J.I. 2023. Preparation of hydrolyzed sugarcane molasses as a low-cost medium for the mass production of probiotic *Lactobacillus paracasei* ssp. *paracasei* F19. *Separations*. 10(1):33. <https://doi.org/10.3390/separations10010033>
- AMRANE, A.; PRIGENT, Y. 1998. Influence of yeast extract concentration on batch cultures of *Lactobacillus helveticus*: growth and production coupling. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. 14:529-534. <https://doi.org/10.1023/A:1008828415639>
- AYALA, L.; GARCÍA, Y.; SAVÓN, L.L.; BOUCOURT, R.; CASTRO, M.; HERRERA, M. 2014. Evaluación de la actividad probiótica del *Lactobacillus pentosus* en indicadores de salud y productivos de cerditos destetados. *Revista Computadorizada de Producción Porcina*. 21(3):130-133.
- BENAÏSSA, M.; ZADI-KARAM, H.; KARAM, N.E. 2017. Development of a sweet whey-based medium for culture of *Lactobacillus*. *African Journal of Biotechnology*. 16(30):1630-1637. <http://dx.doi.org/10.5897/AJB2017.16088>
- BINTSIS, T. 2018. Lactic acid bacteria as starter cultures: An update in their metabolism and genetics. *AIMS Microbiology*. 4(4):665-684. <http://dx.doi.org/10.3934/microbiol.2018.4.665>
- CHIANG, M.L.; CHEN, H.C.; CHEN, K.N.; LIN, Y.C.; LIN, Y.T.; CHEN, M.J. 2015. Optimizing production of two potential probiotic lactobacilli strains isolated from piglet feces as feed additives for weaned piglets. *Asian Australas Journal of Animal Sciences*. 28(8):1163-1170. <http://dx.doi.org/10.5713/ajas.14.0780>
- CHIN, W.L.; KEE, P.E.; NG, H.S.; LAN, J.C.W.; TAN, J.S. 2024. Selective screening *Lactobacillus* spp. against *Escherichia coli* and *Salmonella typhimurium* and optimizing a cane molasses-based medium with *Lactobacillus acidophilus* as a guiding model. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 160:105197. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2023.105197>
- COELHO, L.F.; DE LIMA, C.J.B.; RODOVALHO, C.M.; BERNARDO, M.P.; CONTIERO, J. 2011. Lactic acid production by new *Lactobacillus plantarum* LMISM6 grown in molasses: optimization of medium composition. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. 28(1):27-36. <https://doi.org/10.1590/S0104-66322011000100004>
- DE MAN, J.C.; ROGOSA, M.; SHARPE, M.E. 1960. A medium for the cultivation of *Lactobacilli*. *Journal of Applied Microbiology*. 23(1):130-135. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.1960.tb00188.x>
- DI RIENZO, J.A.; CASANOVES, F.; BALZARINI, M.G.; GONZALEZ, L.; TABLADA, M.; ROBLEDO, C.W. 2012. InfoStat versión 2012. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. Disponible desde Internet en: <http://www.infostat.com.ar>
- DORAN, P.M. 2013. Bioprocess engineering principles. Segunda edición. Academic Press. London. 919p. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-22348-8>
- DUNCAN, D.E. 1955. Multiple range and multiple F. test. *Biometrics*. 11:1.
- ESCOBAR-RAMÍREZ, M.C.; JAIMEZ-ORDAZ, J.; ESCORZA-IGLESIAS, V.A.; RODRÍGUEZ-SERRANO, G.M.; CONTRERAS-LÓPEZ, E.; RAMÍREZ-GODÍNEZ, J.; CASTAÑEDA-OVANDO, A.; MORALES-ESTRADA, A.I.; FELIX-REYES, N.; GONZÁLEZ-OLIVARES, L.G. 2020. *Lactobacillus pentosus* ABHEAU-05: An *in vitro* digestion resistant lactic acid bacterium isolated from a traditional fermented Mexican beverage. *Revista Argentina de Microbiología*. 52(4):305-314. <https://doi.org/10.1016/j.ram.2019.10.005>
- FENSTER, K.; FREEBURG, B.; HOLLARD, C.; WONG, C.; LAURSEN, R.R.; OUWEHAND, A.C. 2019. The production and delivery of probiotics: A review of a practical approach. *Microorganisms*. 7(3):83. <http://dx.doi.org/10.3390/microorganisms7030083>
- GARCÍA HERNÁNDEZ, Y.; PÉREZ SÁNCHEZ, T. 2015. Obtención de microorganismos con actividad probiótica para animales monogástricos. *Anales de la Academia de Ciencias de Cuba*. 5(3):1-19.
- GARCÍA-HERNÁNDEZ, Y.; PÉREZ-SÁNCHEZ, T.; BOUCOURT, R.; BALCÁZAR, J.L.; NICOLI, J.R.; MOREIRA-SILVA, J.; RODRÍGUEZ, Z.; FUERTES,

- H.; NUÑEZ, O.; ALBELO, N.; HALAIHEL, N. 2016. Isolation, characterization and evaluation of probiotic lactic acid bacteria for potential use in animal production. Research in Veterinary Science. 108:125-132. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rvsc.2016.08.009>
- GRATTEPANACHE, F.; LACROIX, C. 2013. 13 - Production of viable probiotic cells. En: McNeil, B.; Archer, D.; Giavasis, I.; Harvey, L. Microbial production of food ingredients, enzymes and nutraceuticals. Woodhead Publishing Limited. ETH Zürich, Switzerland. p.321-353. <http://dx.doi.org/10.1533/9780857093547.2.321>
- GUTIÉRREZ GONZÁLEZ, D.; GARCÍA HERNÁNDEZ, Y.; SOSA COSSIO, D. 2020. El efecto de *Lactobacillus pentosus* LB-31 como aditivo microbiano en la alimentación de corderos. Livestock Research for Rural Development. 32(3):43.
- HANOUNE, S.; DJEGHRI-HOCINE, B.; KASSAS, Z.; DERRADJI, Z.; BOUDOUR, A.; BOUKHEMIS, M. 2015. Optimization of *Lactobacillus fermentum* DSM 20049 growth on whey and lupin based medium using response surface methodology. Advance Journal of Food Science and Technology. 9(9):679-685. <http://dx.doi.org/10.19026/ajfst.9.1759>
- JAMES, M.; VELASTEGUI, E.; CRUZ, M.A. 2017. Evaluación de las condiciones de cultivo de *Lactobacillus acidophilus* y *Lactobacillus casei* a nivel de laboratorio, con inulina como fuente de carbono. Bionatura. 2(1):235-240. <http://dx.doi.org/10.21931/RB/2017.02.01.4>
- JURADO-GÁMEZ, H.; CALPA-YAMÁ, F.; CHASPUENGAL-TULCÁN, A. 2014. Determinación de parámetros cinéticos de *Lactobacillus casei* en dos medios probióticos. Revista Veterinaria y Zootecnia. 8(2):15-35. <http://dx.doi.org/10.17151/vetzo.2014.8.2.2>
- JURADO-GÁMEZ, H.; RAMÍREZ, C.; AGUIRRE, D. 2013. Cinética de fermentación de *Lactobacillus plantarum* en un medio de cultivo enriquecido como potencial probiótico. Revista Veterinaria y Zootecnia. 7(2):37-53.
- MONTES, A.; SANTACRUZ, A.; SAÑUDO, J.; PAZOS, A. 2003. Efecto in vitro de *Lactobacillus casei subsp rhamnosus* sobre el crecimiento de un aislado de *Helicobacter pylori*. Revista del Centro de Estudios en Salud. 1(4):5-12.
- MOZZI, F. 2016. Lactic acid bacteria. En: Caballero, B.; Finglas, P.M.; Toldrá, F. Encyclopedia of food and health. Centro de Referencia para Lactobacilos (CERELA)-CONICET, Academic Press. San Miguel de Tucumán, Argentina. p.501-508. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-384947-2.00414-1>
- OSSA, J.A.; VANEGAS, M.C.; BADILLO, A.M. 2010. Evaluación de la melaza de caña como sustrato para el crecimiento de *Lactobacillus plantarum*. Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica. 13(1):97-104. <https://doi.org/10.31910/rudca.v13.n1.2010.713>
- PYAR, H.; LIONG, M.T.; PEH, K.K. 2014. Potentials of pineapple waste as growth medium for *Lactobacillus* species. International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences. 6(1):142-145.
- REUTER, G. 1985. Elective and selective media for lactic acid bacteria. International Journal of Food Microbiology. 2(1-2):55-68. [https://doi.org/10.1016/0168-1605\(85\)90057-1](https://doi.org/10.1016/0168-1605(85)90057-1)
- RODRIGUES, L.; TEIXEIRA, J.; OLIVEIRA, R. 2006. Low-cost fermentative medium for biosurfactant production by probiotic bacteria. Biochemical Engineering Journal. 32(3):135-142. <http://dx.doi.org/10.1016/j.bej.2006.09.012>
- ROGOSA, M.; MITCHELL, J.A.; WISEMANN, R.E. 1951. A selective medium for the isolation and enumeration of oral and fecal lactobacilli. Journal of Bacteriology. 62(1):132-133. <https://doi.org/10.1128/jb.62.1.132-133.1951>
- ROJAS MOGOLLÓN, C.; OCHOA MOGOLLÓN, G.; ALFARO AGUILERA, R.; QUEREVALÚ ORTIZ, J.; SÁNCHEZ SUÁREZ, H. 2021. Producción y evaluación de inóculos lácteos probióticos obtenidos del tracto digestivo de lechón (*Sus scrofa domestica*) propuestos para alimentación porcina. Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias. 12(1):120-137. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v12i1.5445>
- ROMERO-MOTA, D.I.; ESTRADA-GARCÍA, J.; SALES-PÉREZ, R.E.; MÉNDEZ-CONTRERAS, J.M. 2023. Valorization of bovine manure and molasses by the production of lactic acid and biomass through probiotic anaerobic cofermentation with *Lactobacillus acidophilus*, *Lactobacillus fermentum*, and *Bacillus subtilis*. Journal of Environmental Engineering. 150(2). <https://doi.org/10.1061/JOEEDU.EEENG-7542>
- SAAVEDRA, S.; ALEJANDRO-PAREDES, L.; FLORES-SANTOS, J.C.; FLORES-FERNÁNDEZ, C.N.; ARELLANO-GARCÍA, H.; ZAVALA, A.I. 2021. Optimization of lactic acid production by *Lactobacillus plantarum* strain Hui1 in a medium containing sugar cane molasses. Agronomía Colombiana. 39(1):98-107. <https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v39n1.89674>
- SÁNCHEZ, M.I.; SANTOS, A.; DUSTET, J.C.; GUERRA, G.; LEÓN, T.; ARGÜELLES, J.; RAMOS-LEAL, M.; MANZANO, A.M.; CASADO, G.; GÓMEZ, B. 2007. Estudio fisiológico de una cepa de levadura con potencialidades para el enriquecimiento proteico del bagazo

- de caña de azúcar. Revista CENIC Ciencias Biológicas. 38(1):39-43.
- SANTOS, M.I.; TYMCZYSZYN, E.; GOLOWCZYC, M.; MOBILI, P.; GOMEZ-ZAGLIA, A. 2016. Probiotic cell cultivation. En: London, L.E.E.; Ross, R.P.; Fitzgerald, G.F.; Shanahan, F.; Caplice, N.M.; Stanton, C. Advances in probiotic technology. CRC Press. p.45.
- SAWATARI, Y.; YOKOTA, A. 2007. Diversity and mechanisms of alkali tolerance in *Lactobacilli*. Applied and Environmental Microbiology. 73(12):3909-3915. <https://doi.org/10.1128/AEM.02834-06>
- SOSA COSSIO, D.; GARCÍA HERNÁNDEZ, Y.; DUSTET MENDOZA, J.C. 2018. Desarrollo de probióticos destinados a la producción animal: experiencias en Cuba. Cuban Journal of Agricultural Science. 52(4):357-373.
- VERA MEJÍA, R.; SÁNCHEZ MIRANDA, L.; ZAMBRANO GAVILARES, P.; RODRÍGUEZ PERDOMO, Y. 2021. Obtención de un candidato a probiótico de *Lactobacillus plantarum* 22 LMC a partir de un medio de cultivo natural con materias primas agroindustriales. Revista de Salud Animal. 43(3):1-6.
- WAN MANSOR, W.N.; MOHD ZAINI, N.S.; GENGAN, G.; ABDULLAH, A.H.; MOHD SHA'ARI, A.A.; ROSLAN, A.Z.; ABD RAHIM, M.H. 2024. Enhancing ergogenic performance and antioxidant benefits of red sugarcane juice through probiotic fermentation. Discover Food. 4:32. <https://doi.org/10.1007/s44187-024-00092-w>
- WANG, T.; LU, Y.; YAN, H.; LI, X.; WANG, X.; SHAN, Y.; YI, Y.; LIU, B.; ZHOU, Y.; LÜ, X. 2020. Fermentation optimization and kinetic model for high cell density culture of a probiotic microorganism: *Lactobacillus rhamnosus* LS-8. Bioprocess and Biosystems Engineering. 43(3):515-528. <https://doi.org/10.1007/s00449-019-02246-y>
- ZAYED, G.; WINTER, J. 1995. Batch and continuous production of lactic acid from salt whey using free and immobilized cultures of *Lactobacilli*. Applied Microbiology and Biotechnology. 44(3-4):362-366. <https://doi.org/10.1007/BF00169930>

Quantification and characterization of nitrifying bacteria isolated from an aquaponic system

Cuantificación y caracterización de bacterias nitrificantes aisladas de un sistema acuapónico

Natalia Naranjo-Robayo^{1*} ; Maribeb Castro-González¹ ; Edwin Gómez-Ramírez¹ 

¹Universidad Militar Nueva Granada, Facultad de Ciencias Básicas y Aplicadas, Grupo de Ecotoxicología, Evolución, Medio ambiente y Conservación. Cajicá, Colombia. e-mail: est.natalia.naranjo@unimilitar.edu.co; maribeb.castro@unimilitar.edu.co; edwin.gomez@unimilitar.edu.co

*corresponding autor: est.natalia.naranjo@unimilitar.edu.co

How to cite: Naranjo-Robayo, N.; Castro-González, M.; Gómez-Ramírez, E. 2025. Quantification and characterization of nitrifying bacteria isolated from an aquaponic system. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 28(1):e2653. <http://doi.org/10.31910/rudca.v28.n1.2025.2653>

Open access article published by Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, under a Creative Commons CC BY-NC 4.0 License.

Official publication of the Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, a Higher Education Institution Accredited of High Quality by the Ministry of National Education.

Received: May 6, 2024

Accepted: May 16, 2025

Edited by: Helber Adrian Arévalo Maldonado

ABSTRACT

Nitrifying bacteria are essential in aquaponic systems because they transform nitrogenous waste into useful plant nutrients, preventing ammonium toxicity in fish. This study aimed to quantify and characterize cultivable nitrifying bacteria in an aquaponic system over time, using two replicated systems with watercress (*Nasturtium officinale*), and the fishes Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*), red tilapia (*Oreochromis* sp.), and white pacu (*Piaractus orinoquensis*). Samples were collected at three moments (0, 3, and 6 months) from the fish tank, hydrocyclone, and biofilter. The highest bacterial abundance was detected in the fish tanks, likely due to higher oxygen levels and nutrient availability, with a consistent increase over time. Correlation analysis indicated that certain nutrients, such as potassium, phosphate, manganese, and nitrate, could favor the proliferation of nitrifying bacteria. Nine bacterial morphotypes were isolated and phenotypically characterized, with most displaying Gram-positive staining and negative urea hydrolysis. This study provides insight into the spatiotemporal dynamics of nitrifying bacteria in aquaponic systems, highlighting their role in nutrient cycling. The high bacterial abundance observed underscores the system's potential for efficient nutrient reuse. Molecular techniques such as 16S rRNA gene sequencing and metagenomics are recommended to confirm bacterial identity and better understand community structure. These findings reinforce the ecological importance of nitrifying bacteria in system performance and advancing sustainable agricultural practices.

Keywords: Hydroponics; Nitrification; Pisciculture; Recirculating nutrient systems; Sustainable agriculture.

RESUMEN

Las bacterias nitrificantes son esenciales en los sistemas acuapónicos porque transforman los desechos nitrogenados en nutrientes útiles para las plantas, evitando la toxicidad por amonio en los peces. Este estudio buscó cuantificar y caracterizar las bacterias nitrificantes cultivables en un sistema acuapónico a lo largo del tiempo, utilizando dos sistemas replicados con la planta berro (*Nasturtium officinale*), y los peces tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*), tilapia roja (*Oreochromis* sp.) y cachama blanca (*Piaractus orinoquensis*). Se tomaron muestras en tres momentos (0, 3 y 6 meses) del tanque de peces, hidrociclón y biofiltro. La mayor abundancia bacteriana se detectó en los tanques de peces, probablemente debido a mayores niveles de oxígeno y disponibilidad de nutrientes, observándose un incremento a lo largo del tiempo. El análisis de correlación indicó que ciertos nutrientes como potasio, fosfato, manganeso y nitrato podrían favorecer la proliferación de bacterias nitrificantes. Se aislaron y caracterizaron fenotípicamente nueve morfotipos bacterianos, la mayoría de los cuales presentó tinción Gram positiva e hidrólisis de urea negativa. Se proporciona información sobre la dinámica espaciotemporal de las bacterias nitrificantes en sistemas acuapónicos, destacando su papel en el reciclaje de nutrientes. La elevada abundancia bacteriana registrada resalta el potencial del sistema para la reutilización eficiente de nutrientes. Se recomienda aplicar técnicas moleculares, como la secuenciación del gen 16S rRNA y el análisis metagenómico, para identificar los morfotipos y entender mejor la comunidad microbiana. Estos hallazgos refuerzan la importancia de las bacterias nitrificantes en el rendimiento del sistema y el avance de prácticas agrícolas sostenibles.

Palabras clave: Agricultura sostenible; Hidroponía; Nitrificación; Piscicultura; Sistemas de recirculación de nutrientes.

INTRODUCTION

The aquaponic system is an integrated and sustainable method that simultaneously cultivates plants and aquatic organisms by recirculating nutrients through water, combining the principles of conventional aquaculture with hydroponics (Love *et al.* 2015). This model is fundamentally based on the Recirculating Aquaculture System (RAS), which includes essential components such as a fish tank, mechanical and biological filtration units, aeration systems, and water circulation infrastructure. The three major biological communities: plants, fish, and nitrifying bacteria that interact within a closed-loop, nutrient-recirculating environment (Love *et al.* 2014).

Through a diverse microbial consortium of microorganisms with metabolic pathways involved in nitrogen transformations, the fish waste and uneaten fish feed can become plant-accessible nutrients (Goddek *et al.* 2016; Bartelme *et al.* 2019). This process enhances sustainability by reducing nutrient discharge and utilizing fish-derived waste as a nutrient source for plants, closing the loop in the nutrient cycling (Lal *et al.* 2024).

Nitrogen recycling in aquaponic systems begins when fish excrete nitrogen primarily in two forms: ammoniacal nitrogen ($\text{NH}_4^+/\text{NH}_3$), which is released mainly through the gills and to a lesser extent via urine, and organic nitrogen, which is expelled as solid feces (Canfield *et al.* 2010). Additionally, uneaten feed contributes to the system's nitrogen load by introducing both organic compounds, such as proteins, and trace amounts of inorganic nitrogen (Bartelme *et al.* 2018). Although ammonium (NH_4^+) is relatively non-toxic, un-ionized ammonia (NH_3) is highly toxic to aquatic organisms, with its toxicity increasing under higher pH and temperature conditions. Toxic effects in fish have been observed at concentrations as low as 0.05–0.2 mg/L of NH_3 , a significant concern for species such as Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) and white pacu (*Piaractus orinoquensis*), both commonly farmed in tropical aquaponic systems (Gyamfi *et al.* 2024). From the plant perspective, both ammonium and nitrate are assimilable forms of nitrogen; however, nitrate is generally preferred in hydroponic and aquaponic setups due to its chemical stability, lower toxicity, and greater compatibility with nutrient uptake mechanisms (Britto & Kronzucker, 2013).

Studies demonstrate different environmental conditions and microbial abundance in each component of an aquaponic system, which can be related to specific functions (Schmautz *et al.* 2021). Therefore, identifying the microbial communities in each compartment is essential for understanding how the system operates holistically, particularly in terms of water quality, and plant and fish health (Munguia-Fragozo *et al.* 2015). Such insights can help address current gaps in aquaponic crop production and enhance system efficiency (Bartelme *et al.* 2018).

Central to this process are nitrifying bacteria, which play a vital role in converting ammonia first to nitrite (via ammonia-oxidizing bacteria, AOB) and then to nitrate (via nitrite-oxidizing bacteria,

NOB), thereby supporting plant growth and preventing toxic ammonia buildup (Maier, 2000; Owen & Jones, 2001). Key bacterial genera involved in these nitrification steps include *Nitrosomonas*, *Nitrospira*, and *Nitrobacter* (Wongkiew *et al.* 2017).

Despite the growing adoption of aquaponic systems in Latin America, data on the composition and activity of nitrifying bacterial communities in Colombian systems remain scarce. Therefore, the objective of this research was to describe and quantify the nitrifying bacteria present in an aquaponic system to contribute to the broader understanding of microbial nitrogen dynamics and support the development of more efficient and ecologically sustainable aquaponic practices.

MATERIALS AND METHODS

Experimental setup. The study was conducted in the Hydrobiology Laboratory and aquaponics system of greenhouse of Ictiology of Universidad Militar Nueva Granada located in Cajicá, Colombia (5°01' N, 74°01' W; 2,558 m a.s.l.). The study followed the methodology described by Aguirre (2023), with adaptations to a vertical NFT system. Two identical small-scale aquaponic systems (S1 and S2) were constructed and operated under identical environmental and operational conditions as parallel replicates for six months.

Each system was composed of the following main components: a fish rearing tank, a hydrocyclone (clarifier), a biological filtration unit (biofilter), and a vertical hydroponic system based on the Nutrient Film Technique (NFT). All components were connected through PVC piping in a closed-loop configuration. In each system, watercress (*Nasturtium officinale*) was planted in the hydroponic NFT vertical with 40 plants, and a polyculture of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*), red tilapia (*Oreochromis* sp.), and white Cachama (*Piaractus orinoquensis*) was arranged in a tank of 1,000 Liters with a stocking density of 3–8 kg/m³ (Figure 1). The system was equipped with an airflow blower for air circulation and a water pump for water flow regulation, so the water was circulated continuously. Fish were manually fed twice daily with a commercial diet containing 32% crude protein. Feeding rates were adjusted biweekly to correspond to 2–4% of the total fish biomass, with average daily feed input ranging from 150 to 300 g per system. No automated feeding systems were used.

Aquaponics system description. The aquaponic system consisted of a 1,000-liter cylindrical polyethylene fish tank stocked at a density of approximately 100 fish/m³, comprising a polyculture of *Oreochromis niloticus*, *Oreochromis* sp., and *Piaractus orinoquensis*, with an overall biomass ranging from 3 to 8 kg/m³. Continuous aeration was provided by a 0.5 HP blower connected to fine bubble diffusers. Solid waste from the fish tank was directed to a 500-liter hydrocyclone clarification unit, which included an internal PVC structure and a Matala filter mat to facilitate sedimentation and solids removal. The clarified water then entered a 250-liter biofilter containing 10 kg of Kaldnes-type plastic media, which was aerated to promote the growth of nitrifying bacterial biofilms. The treated

water was subsequently delivered to a vertical NFT (nutrient film technique) hydroponic unit comprising 1.6-meter PVC towers, each supporting 40 watercress (*Nasturtium officinale*) plants. Nutrient-rich water was recirculated from the central reservoir to the top of each tower and flowed downward through the root

zone. Water circulation throughout the system was maintained using submersible pumps with a flow rate of 2,000 L/h. Estimated hydraulic retention times were 24 h in the fish tank, 6–8 h in the biofilter, and 30–40 min in the hydroponic unit. The total operational volume of the system was approximately 1,200 liters.

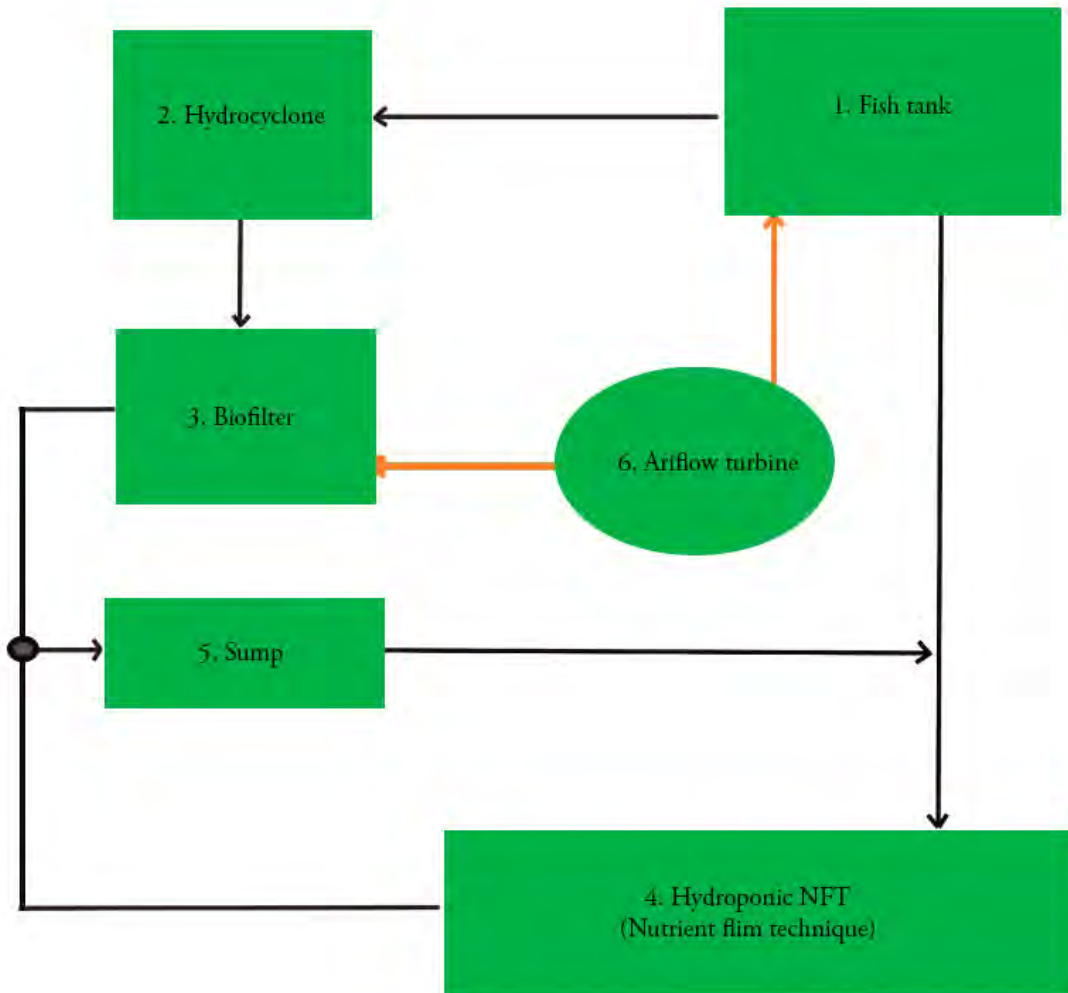


Figure 1. Schematic representation of the experimental aquaponic system. Components: 1. Fish tank, 2. Hydrocyclone (clarifier), 3. Biofilter, 4. Vertical hydroponic unit using the Nutrient Film Technique (NFT), 5. Water reservoir, and 6. Recirculation pump (turbine).

Water quality parameters. Water quality parameters were monitored to evaluate the physicochemical conditions of the aquaponic system and to correlate them with microbial activity. Temperature and pH were measured weekly using a multiparameter probe (HI 9829, Hanna® Instruments). Nutrient concentrations, including ammonium (NH_4^+), nitrite (NO_2^-), nitrate (NO_3^-), phosphate (PO_4^{3-}), calcium (Ca^{2+}), iron ($\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$), potassium (K^+), and manganese (Mn^{2+}), were analyzed every 15 days via spectrophotometry using Spectroquant® kits (Merck).

Analytical procedures followed the manufacturer's specifications and were aligned with the Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2017), employing the following

equivalent methods: 4500- NH_3 for ammonium, 4500- NO_2^- for nitrite, 4500- NO_3^- for nitrate, and 4500-P for phosphate. Also, it was performed weekly, replacing 10–15% of the total volume to maintain ionic balance and water quality. The pH levels were maintained between 6.5–7, and adjusted, when necessary, by adding calcium bicarbonate to increase alkalinity or hydrochloric acid (HCl) to lower the pH.

Isolate and bacteria quantification. Water samples for microbial analysis were collected from three components of each aquaponic system: (1) the fish tank, (2) the hydrocyclone (clarifier), and (3) the biofilter. In all cases, samples were obtained at a depth of 10 cm below the surface using sterilized containers of 10 mL. For

the biofilter, 50 g of water plastic biofilter media (biochips) was taken to obtain the surface-attached microbial communities. To detach bacteria from the biofilm, samples were transferred to sterile Erlenmeyer flasks and vortexed at 2,500 rpm for 10 minutes in 10 mL of water before inoculation.

A selective ammonium-based medium for nitrifying bacteria, as described by Verhagen & Laanbroek (1991), was used and adapted to the environmental conditions of the aquaponic system (Table 1) to promote bacterial growth under system-specific parameters. Serial dilutions (10^{-1} , 10^{-2} , and 10^{-3}) were prepared in triplicate with the selective ammonium medium. These dilution levels were selected based on preliminary trials and methodologies reported in the literature to optimize the detection range for bacterial abundance under controlled conditions. From each dilution, 1 mL aliquots were inoculated into ammonium broth and incubated at 28 °C for 15 days. Following incubation, two drops of Griess reagent were added to detect nitrite formation (indicated by a red color), zinc powder was used to confirm nitrate presence (yellow coloration), and Nessler's reagent was added to detect residual ammonium (brown precipitate). Quantification of nitrifying bacteria was carried out using the Most Probable Number (MPN) method, following the protocol described by Chandrapati & Williams (2014).

Characterization of nitrifying bacteria. Triplicate isolation to obtain pure strains in a selective medium (Table 1). After 15 days of incubation at 21,5 °C, the pure strains were characterized macroscopically by size, color, and texture, while microscopically their morphology was identified by Gram staining. Biochemically, the strains were characterized by oxidase, catalase, motility, indole, urea, lysine, glucose, lactose, arginine, inositol, TSI, citrate, MacConkey, MRS, and the presence of CO₂ (Chauhan & Jindal, 2020).

Statistical analysis. The data were parametric, as the microbial abundance data were validated by the normality requirement Shapiro-Wilk test = 0.0001; $p < 0.05$. To assess the difference between MPN/L values per component, stage, and aquaponic system, a randomized block design factorial analysis was performed, followed by the Tukey-Kramer HSD Test. Likewise, the Pearson's correlation test was used to observe significant differences between nutrients related to the abundance of nitrifying bacteria. Statistical analyses were conducted using R Studio software v. 4.0.2 for Windows.

Table 1. Composition of the culture medium used for the selective growth of nitrifying bacteria.

Component	Concentration g/L
Ammonium sulfate	0.5g
Potassium phosphate	1g
Magnesium sulfate	0.3g
Sodium chloride	0.3g
Ferrous sulfate	0.03g
Calcium carbonate	1g
Water	1L
pH	6.6
Agar	18g

RESULTS AND DISCUSSION

Water quality parameters. On average, the aquaponic systems, based on water quality parameters such as concentrations of ammonium, nitrite, and nitrate, were within the recommended range for effective nitrification and optimal growth of plants and fish. Considering the species used, optimal growth temperatures range from 14 to 30 °C (Wongkiew *et al.* 2018) (Table 2).

Parameters such as pH, temperature, nitrite, phosphates, calcium, iron, potassium, and manganese showed no significant variation ($p > 0.05$) within the aquaponics systems. This suggests that the aquaponics system maintained appropriate water quality throughout the experiment (Birolo *et al.* 2020; Torres-Mesa *et al.* 2023). The pH remained within the recommended range for the

optimal development of the aquaponic system (pH 6-7), and the temperature (18-30°C) was within acceptable ranges for the plant growth (Somerville *et al.* 2014).

During the study, fish mortalities were minimal (< 5%), and no outbreaks of disease or major stress symptoms were observed. Watercress plants showed healthy vegetative growth throughout the cultivation period, with no significant signs of nutrient deficiency or wilting.

Nitrifying bacteria quantification. An abundance >1100 (MPN/L) was quantified (Figure 2), where F-test yielding a p-value >0.05, indicating that the data followed a normal distribution. The experiment was replicated under identical conditions, and no statistically significant differences were observed between the

replicate systems ($p < 0.50$). When analyzing grouped data, no significant differences were found among the means. Therefore, increasing the number of biological replicates is recommended

to reduce variability and improve the statistical robustness of abundance measurements.

Table 2. Water quality parameters in the fish tank of aquaponic systems S1 and S2.

Parameters	Mean $\pm$ SD (S1)	Mean $\pm$ SD (S2)
pH	6,63 $\pm$ 0,63	6,53 $\pm$ 0,72
Temperature °C	21,45 $\pm$ 1,63	21,68 $\pm$ 1,57
Ammonium mg/L	0,22 $\pm$ 0,36	0,40 $\pm$ 0,49
Nitrite ug/L	29,0 $\pm$ 21,36	29,0 $\pm$ 19,1
Nitrate mg/L	68,60 $\pm$ 26,38	95,71 $\pm$ 48,04
Phosphate mg/L	10,31 $\pm$ 7,14	10,84 $\pm$ 5,40
Calcium mg/L	53,15 $\pm$ 26,89	46,65 $\pm$ 24,45
Iron mg/L	0,23 $\pm$ 0,31	0,16 $\pm$ 0,18
Potassium mg/L	11,46 $\pm$ 13,18	9,92 $\pm$ 6,55
Manganese mg/L	0,41 $\pm$ 0,38	0,21 $\pm$ 0,09

In the quantitative analysis of bacterial abundance across the components of the aquaponic system, the fish tank and biofilter exhibited the highest nitrifying bacteria abundances (Figure 2). This trend is likely influenced by the combination of nitrogenous waste from fish excretion and the continuous aeration typically present in these components, which together create favorable conditions for the proliferation of nitrifying bacteria. Although dissolved oxygen levels were not measured in this study, similar patterns have been reported by Schmautz *et al.* (2021), who demonstrated that higher oxygen availability promotes nitrifier activity and abundance. Furthermore, despite the biofilter representing only one-quarter of the volume of the fish tank, it incorporated a plastic substrate with a high specific surface area that likely enhanced bacterial colonization and biofilm formation (Aguirre *et al.* 2023).

In contrast, the hydrocyclone exhibited the lowest bacterial abundance. This component primarily functions to facilitate the sedimentation of suspended solids, such as feces and uneaten food, for subsequent removal from the system (Ramírez Sánchez *et al.* 2011). Notably, the hydrocyclone does not feature aeration, as it could resuspend the particles being settled. As a result, low oxygen concentrations in this component likely contributed to the observed reduction in bacterial abundance, particularly nitrifying bacteria. Anoxic conditions generated within the hydrocyclone likely hindered bacterial growth, as these environments are unfavorable for nitrification (Schmautz *et al.* 2021). This hypothesis is supported by Carrasquero Ferrer *et al.* (2014), who found a positive correlation between elevated oxygen levels and enhanced nitrification rates.

Additionally, the variability of bacterial abundance was examined over time, using the average abundance of each component. The results showed that bacterial abundance generally increased over time, as illustrated in Figure 2.

Assessing bacterial abundance over time revealed the application of the STR Species-time reactions for Bacteria model (Oliver *et al.* 2012). This model elucidates relationships within ecological communities by defining patterns that illustrate fluctuations in abundance, diversity, and richness over time in bacterial communities. These findings reinforce the results: as the system matures, a symbiotic relationship evolves between bacterial communities and the developing environment, leading to lower initial abundance and a subsequent increase in later stages (Torres-Mesa *et al.* 2023).

This study represents the first report of bacterial abundance in aquaponic systems using the MPN technique. Previous research, however, has documented bacterial abundance at the molecular level. For instance, Mehrani *et al.* (2020) identified the genus *Nitrospira* with a relative abundance of 3.8% through 16S rRNA gene sequencing. Similarly, Bartelme *et al.* (2019) highlighted *Nitrospira* as the predominant taxon across all aquaponic system components, emphasizing its role in nutrient recycling and nitrification. A study by Castro-González *et al.* (2023) also found *Nitrospira* to be the dominant genus in all compartments of an aquaponic system from the fourth month onwards. In contrast, *Nitrosomonas* exhibited minimal abundance in the biofilter ($< 5\%$), while archaea oxidizers such as *Candidatus Nitrosopelagicus*, *Candidatus Nitrosopumilus*, and *Candidatus Nitrosotalea* were detected at low levels ($< 10\%$) in the fish tank (Castro-González *et al.* 2023).

The bacterial community's abundance according to the nutrient system. Several interactions were established between the nutrients measured in the aquaponic system and the abundance of nitrifying bacteria (Figure 3).

The nutrients that showed a strong positive correlation were Potassium with a correlation of 0.957, Phosphate with 0.697, and Manganese with 0.669. In addition, a high negative relationship between nitrite and abundance of -0.767 was found (Figure 4). These results displayed notable correlations with bacterial abundance, likely due to their pivotal cellular roles.

On the other hand, ammonia did not show a clear trend or correlation with bacterial abundance (-0.123), despite its known role as a primary substrate for nitrifying bacteria (Figure 4). This weak correlation may be explained by the fact that nitrifying

communities, such as *Nitrosomonas* and *Nitrobacter*, thrive within specific ammonia concentration ranges. Optimal ammonia levels for *Nitrosomonas* activity are typically reported between 1–5 mg/L, beyond which inhibition or substrate limitation may occur depending on system conditions (Prosser, 1990; Vadivelu *et al.* 2007). Similarly, *Nitrobacter* requires sufficient nitrite levels derived from ammonia oxidation but is also sensitive to environmental fluctuations such as pH and oxygen availability. In this study, it is possible that the ammonia concentrations were either below or above optimal thresholds, thus limiting a stronger association with bacterial abundance.

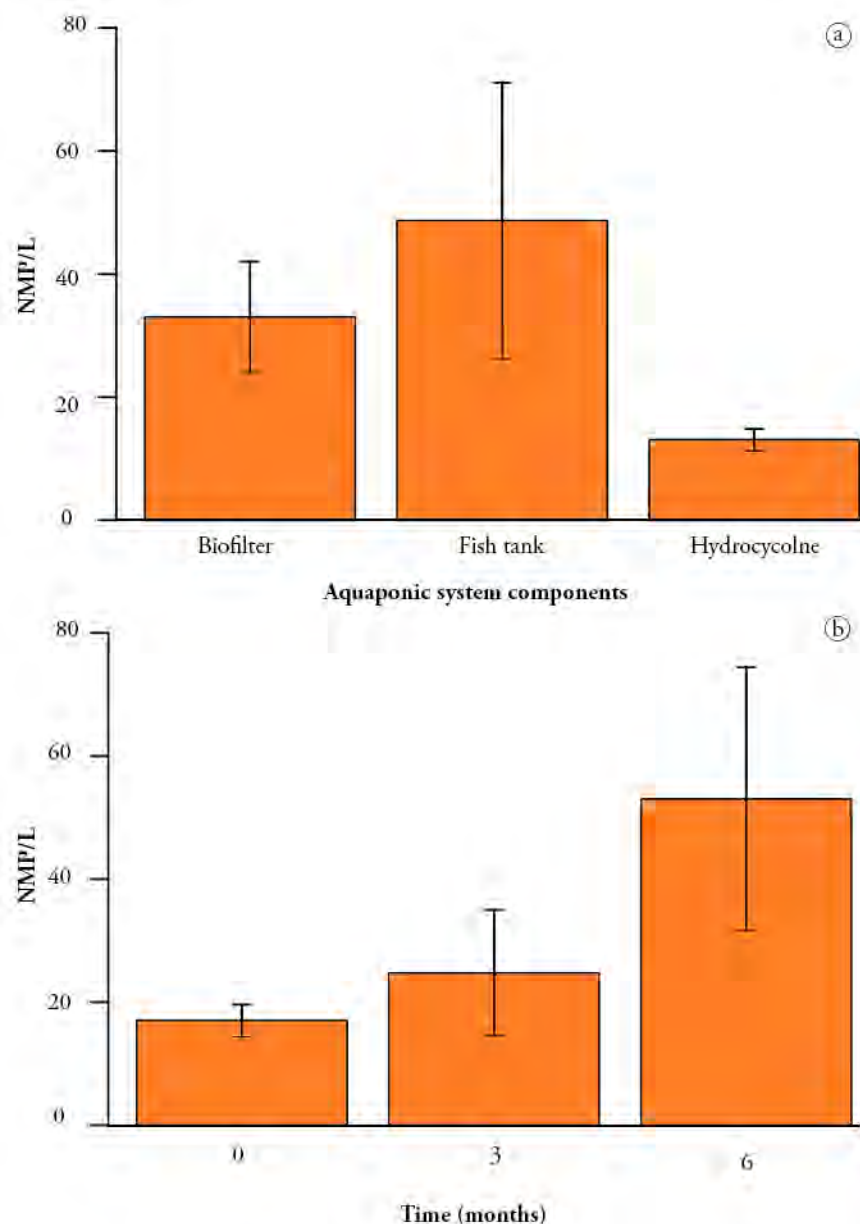


Figure 2. Variation in bacterial abundance (MPN/L). a) at the different aquaponic system components; b) at the different months of operation

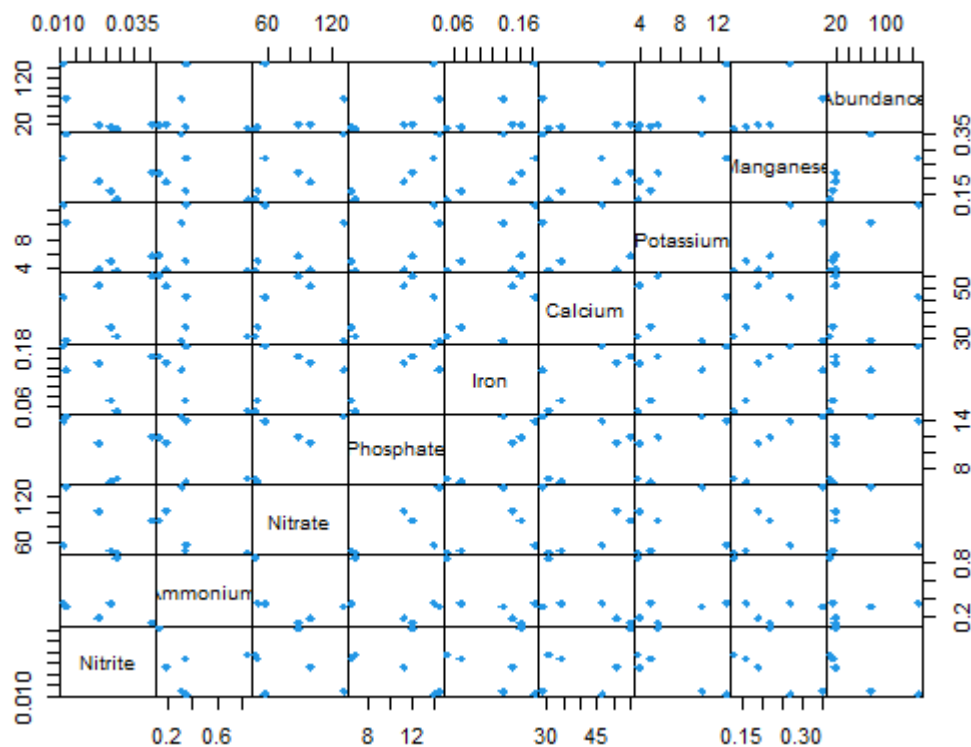


Figure 3. Pearson's correlation matrix, showing the relationships among nutrient concentrations and bacterial abundance in aquaponic systems S1 and S2.

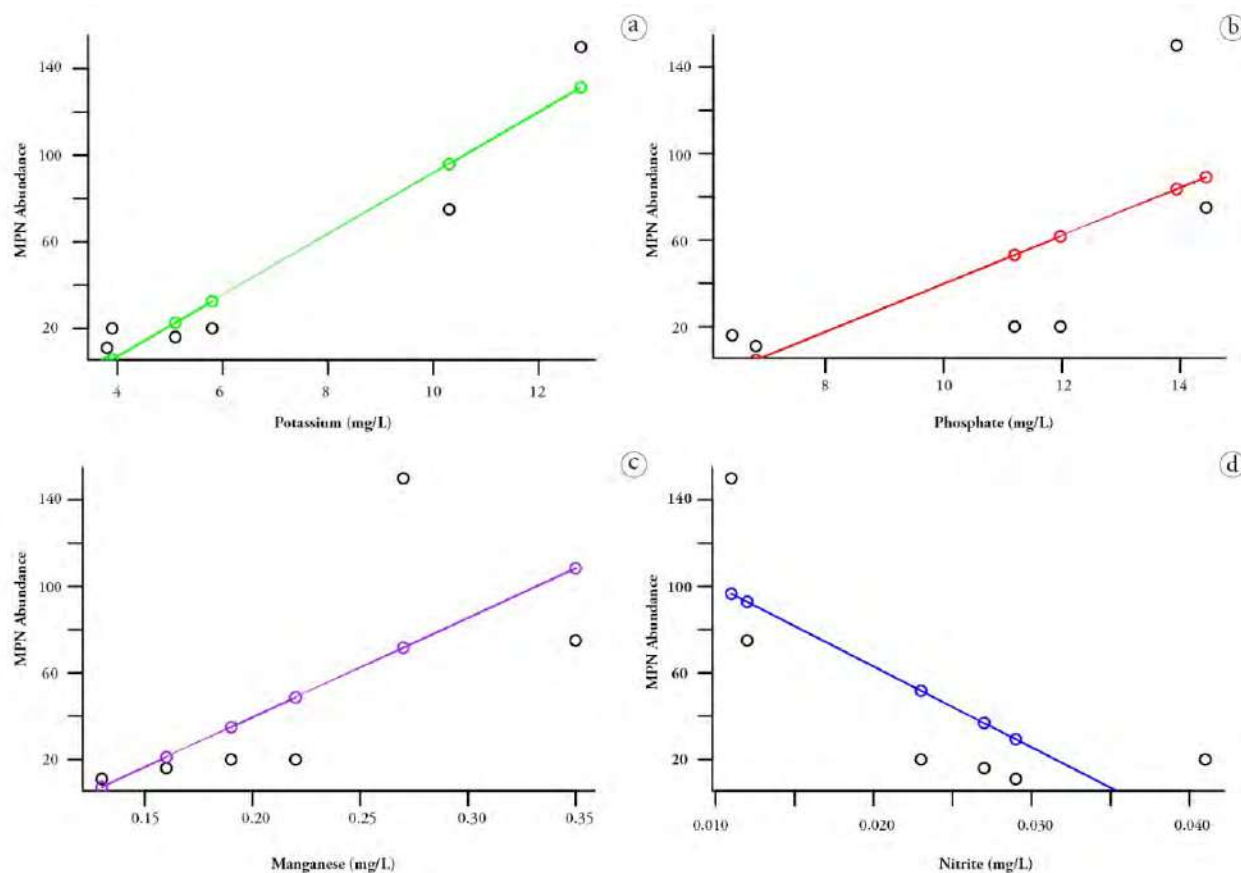


Figure 4. Pearson's correlation between bacterial abundance (MPN) and key physicochemical parameters in an aquaponic system. a. Potassium; b. Phosphate; c. Manganese; d. Nitrite.

The elevated correlation of potassium and the abundance of 66-99% reveal a crucial role in the growth and activity of nitrifying bacteria. Underhill & Prosser (1985) found that potassium ethyl xanthate can induce a prolonged lag in nitrification, while Welch & Scott (1959) established that low potassium levels can inhibit nitrification. Lees & Quastel (1945) further supported this, demonstrating the bacteriostatic effects of potassium chlorate on soil nitrification. Although aquaponic systems are deficient in potassium, perhaps potassium was maintained at relatively high concentrations when potassium hydroxide was added to stabilize the system's pH (Torres-Mesa *et al.* 2023). The potassium contributes to enzyme activation, protein synthesis, and forms a part of teichoic acids in Gram-positive cell walls (Caycedo Lozano *et al.* 2021).

Phosphate is also vital, as its deficiency can inhibit nitrifying bacteria and reduce nitrification efficiency (Nishio *et al.* 2008, Nishio *et al.* 2002). Furthermore, the addition of phosphate has been shown to increase nitrification activity, potentially promoting ammonification by heterotrophic bacteria (Nishio *et al.* 2002). This highlights the importance of phosphate for the growth and activity of nitrifying bacteria.

Manganese is essential for resistance to nitrosative stress, a key component of the innate immune response to bacterial pathogens (Yousuf *et al.* 2020). Manganese oxidation by bacteria is also important in biogeochemical cycles, particularly in the oxidative cycling of Mn in aquatic environments (Sujith & Bharathi 2011). In addition, biomineralization of manganese oxide, a process involving manganese oxidation, is a social trait that protects against nitrite toxicity in bacteria (Zerfaß *et al.* 2018). Manganese is involved in various biochemical processes, such as water splitting and oxygen production, and is a cofactor for enzymes involved in the detoxification of reactive oxygen species (Caycedo Lozano *et al.* 2021).

The negative correlation observed between nitrite and bacterial abundance may be attributed to nitrite accumulation, which is known to inhibit the growth of nitrifying bacteria, particularly *Nitrobacter* (Papp *et al.* 2016). Alternatively, this could reflect the rapid conversion of nitrite into nitrate by nitrite-oxidizing bacteria. Conversely, ammonium showed no clear trend or significant correlation with bacterial abundance (-0.123), despite being a primary substrate for ammonia-oxidizing bacteria such as *Nitrosomonas* (French *et al.* 2012). This lack of association may be explained by low ammonium concentrations in the system, potentially resulting from elevated dissolved oxygen levels in surface layers that favor rapid oxidation of ammonium (Hernández *et al.* 2013). *Nitrosomonas* typically thrives in environments with ammonium concentrations between 1–5 mg/L, and its activity may be limited when concentrations fall below this range (Vadivelu *et al.* 2007). Similarly, *Nitrobacter* prefers moderate nitrite availability but can be inhibited under conditions of nitrite accumulation or oxygen limitation. Given the continuous aeration and efficient nitrification processes in the aquaponic system studied, it is likely that substrate levels for both bacterial groups remained below threshold levels for significant variation in abundance, thus explaining the weak correlation.

Isolation and characterization of nitrifying bacteria. A protocol was standardized for the adequate growth and development of nitrifying bacteria isolated from aquaponic systems. The temperature and pH where the optimal results were obtained were 21.5°C, and pH 6.6. These results coincided with those observed *in situ* in the aquaponic systems evaluated.

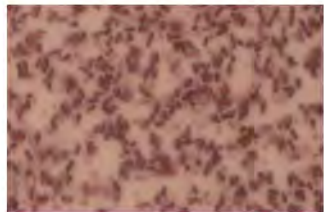
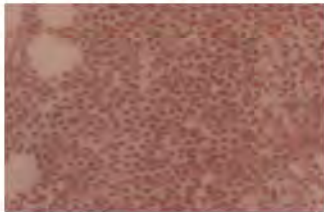
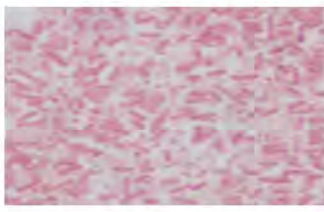
Despite their abundance in the environment, cultivation of nitrifying bacteria remains a challenge, as the nitrification process produces little energy, so the bacteria grow slowly (Farges *et al.* 2012). Cultivating these bacteria is hindered by slow and infrequent growth due to pH decreases and nitrite accumulation, impacting their metabolism (Papp *et al.* 2016). However, these challenges can shift when bacteria exist in a mixed environment where nitrite accumulation is rare, and pH changes are regulated (Farges *et al.* 2012).

Nine strains were isolated and characterized macroscopically, all of which were gram-negative, except for strain M9, which was gram-positive and exhibited a unique spiral morphology (Table 3). However, strain M9 was the only one that could not be purified; for this reason, enzymatic characterization was not performed (Table 3). Most morphotypes had a bright appearance (BA), smooth edges (SE), all were soft in consistency (SC), some exhibited flat elevation (FE), and others presented convex elevation (CE). Two gram-negative cocci morphotypes (M2 and M7) were isolated, along with four gram-negative coccobacillus morphotypes (M4, M5, M6, and M8), and two gram-negative bacillus (M1 and M3).

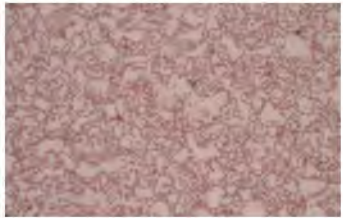
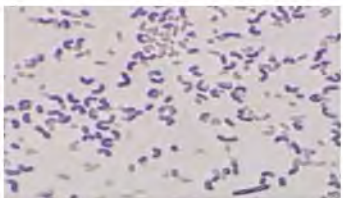
All isolated morphotypes were positive for oxidase, inositol, citrate, CO₂, and growth on MacConkey agar. However, the biochemical urea hydrolysis test was negative, which is of particular importance for the isolation of nitrifying bacteria. In the catalase test, most strains were negative except for morphotypes M1 and M7. Half of the morphotypes exhibited motility (M1, M6, M7, M8) while the other half did not. M1 was the only morphotype positive for indole and iron oxidation. Morphotypes like M5 and M6 can utilize arginine and lysine as their main amino acids for metabolism, unlike M2, M4, M7, and M8, which tested negative for both. M1 and M6 can use both glucose and lactose as a sugar source. On the other hand, M2 and M8 seem to use another sugar source as they tested negative for both (Table 3).

Regarding macro, micro, and biochemical characterizations performed on the isolates (Tables 2 and 3), it's plausible to assume that certain morphotypes such as M1, M3, and M7 could correspond to *Nitrobacter* sp., *Nitrospina* sp., and *Nitrosococcus* sp. based on their characteristics (Kim & Gadd, 2008; Kouki *et al.* 2011). However, precise identification necessitates molecular testing. Similarly, M9 could potentially represent *Nitrospira*, exhibiting a gram-positive, spirilloid morphology commonly found in freshwater (Kim & Gadd, 2008). *Nitrospira*, also known as Comammox (Complete ammonia oxidation), was detected in the same aquaponic system (Castro-González *et al.* 2023) and reported in other aquaponic systems (Bartelme *et al.* 2019; Mehrani *et al.* 2020).

Table 3. Morphological and biochemical characterization of bacterial morphotypes isolated from the aquaponic system.

Morphotype	Morphological traits	Biochemical profile	Image (1000x, Gram stain)
M1	BA, SE, SC, FE; Bacillus (Gram -)	OX+, CAT-, MOT+, IND+, UREA-, LYS-, GLU-, LAC+, ARG+, INO+, TSI+, CIT+, MAC+, MRS-, CO ₂ +	
M2	BA, SE, SC, CE; Coccus (Gram -)	OX+, CAT+, MOT-, IND-, UREA-, LYS-, GLU-, LAC-, ARG-, INO+, TSI-, CIT+, MAC+, MRS-, CO ₂ +	
M3	TA, SE, SC, FE; Bacillus (Gram -)	OX+, CAT+, MOT-, IND-, UREA-, LYS-, GLU+, LAC-, ARG+, INO+, TSI-, CIT+, MAC+, MRS-, CO ₂ +	
M4	BA, SE, SC, FE; Coccobacillus (Gram -)	OX+, CAT+, MOT-, IND-, UREA-, LYS-, GLU-, LAC+, ARG-, INO+, TSI-, CIT+, MAC+, MRS-, CO ₂ +	
M5	TA, SE, SC, FE; Coccobacillus (Gram -)	OX+, CAT+, MOT-, IND-, UREA-, LYS+, GLU+, LAC-, ARG+, INO+, TSI-, CIT+, MAC+, MRS-, CO ₂ +	
M6	TA, SE, SC, FE; Coccobacillus (Gram -)	OX+, CAT+, MOT+, IND-, UREA-, LYS+, GLU+, LAC+, ARG+, INO+, TSI-, CIT+, MAC+, MRS+, CO ₂ +	
M7	BA, SE, SC, FE; Coccus (Gram -)	OX+, CAT-, MOT+, IND-, UREA-, LYS-, GLU-, LAC+, ARG-, INO+, TSI-, CIT+, MAC+, MRS-, CO ₂ +	

Continuación tabla 3.

M8	BA, SE, SC, CE; <i>Coccobacillus</i> (Gram -)	OX+, CAT+, MOT+, IND-, UREA-, LYS-, GLU-, LAC-, ARG-, INO+, TSI-, CIT+, MAC+, MRS-, CO ₂ +	
M9	BA, SE, SC, CE; <i>Spirillum</i> (Gram +)	Not evaluated	

Macroscopic characteristics are described using the following codes: BA = Bright Appearance, TA = Translucent Appearance, SE = Smooth Edge, IE = Irregular Edge, SC = Soft Consistency, CE = Convex Elevation, FE = Flat Elevation. Microscopic morphology was determined by Gram staining at 1000× magnification using oil immersion. Biochemical tests included oxidase, catalase, motility, indole, urea hydrolysis, lysine decarboxylation, glucose/lactose/arginine/inositol fermentation, triple sugar iron (TSI) test, citrate utilization, MacConkey agar growth, MRS medium growth, and CO₂ production. Symbols: (+) positive result; (-) negative result.

No existing studies were found to compare morphotypes M2, M4, M5, M6, and M8 concerning their morphology and described characteristics. It's crucial to note that these comparisons are speculative, based on other studies characterizing nitrifying bacteria. Therefore, molecular tests are recommended to validate this information.

None of the isolated morphotypes demonstrated positive urease activity (Table 3). According to Castellanos-Rozo & Ramos-Parra (2015), urease activity can influence ammonium oxidation by inhibiting the process in certain microorganisms. Similar findings were reported by Masmela-Mendoza *et al.* (2019) in bacteria isolated from pisciculture environments. Furthermore, Koops *et al.* (2006) describe urea hydrolysis as a physiological response often associated with eutrophic conditions, particularly in systems with nutrient overload, such as stabilization ponds. In contrast, aquaponic systems are designed to maintain strict control over water quality parameters, minimizing nutrient accumulation and thus preventing eutrophication. Therefore, the absence of urease activity in the isolates analyzed may reflect the effective nutrient regulation within the studied aquaponic system, rather than being an indicator of eutrophication.

Additionally, the oxidase-catalase results indicated that the isolated microorganisms are primarily aerobic, except for M1 and M7, which lack the catalase enzyme, implying they could be facultative anaerobes (Fernández *et al.* 2010). M1 was the only strain demonstrating indole degradation via xindole, isatin, and anthranilic acid (Li *et al.* 2009). This morphotype was also the sole one capable of oxidizing Fe (II) into Fe (III), utilizing three types of sugars (dextrose, lactose, and sucrose) a trait found in certain nitrifying bacteria (Kim & Gadd, 2008). M6 exhibited growth in both MacConkey and MRS, indicating a potential weakening of

bacteria upon isolation. It's essential to note that the system also harbors other microorganisms like archaea and other uncultivable bacteria (Schmautz *et al.* 2021).

The quantification of nitrifying bacteria using the MPN method revealed their high abundance throughout the entire aquaponic system. Among the system components, the fish tank stood out with the highest bacterial abundance, correlated with elevated nutrient levels and excellent oxygenation. The isolation of nine distinct morphotypes, including a noteworthy gram-positive spirillum, underscores the potential diversity within the system. Further complementary analyses, such as molecular, biochemical, and metagenomic techniques, are recommended to solidify the identity of these isolated bacterial morphotypes. These additional investigations will confirm the identity of the isolated bacteria and delve into their functional roles in enhancing nutrient recycling efficiency within aquaponic systems, thereby fostering environmental sustainability.

Acknowledgments.

This work has been derived from the research project INV-CIAS-3130 conducted in 2019, entitled: "Can Small-scale Aquaponic Systems be a Source of Nitrous Oxide?" This project received funding from the Vice-Rector of Research at Universidad Militar Nueva Granada under the Cooperation Agreement INV-CIAS-3130 of 2019. **Conflict of interest.** The authors declare that the research was conducted in the absence of any commercial, personal or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest. **Funding:** This work was financed by the vice-rectory of research of the Universidad Militar Nueva Granada under the Cooperation Agreement INV-CIAS-3130 of 2019. **Author's contributions:** Natalia Naranjo: performed the experiments, conducted the results

and statistical analysis, discussed the data, reviewed the manuscript, and wrote the original draft. Maribeb Castro González: led the contextualization and experimental design, secured funding, managed the project, and supervised. Edwin Gómez Ramírez: managed the project, supervised, set up, and operated the aquaponic system. All authors contributed to the writing, reviewing, and editing of the manuscript and the final version.

REFERENCES

- AGUIRRE, J.P.; TORRES-MESA, A.; PÉREZ-TRUJILLO, M.M.; RUBIO-CASTRO, S.A.; GÓMEZ-RAMÍREZ, E. 2023. Evaluation of *Fragaria x ananassa* in an aquaponic system with *Oncorhynchus mykiss* and substrate culture conditions. *AACL Bioflux*. 16(5):2589-2600.
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION – APHA. 2017. Standard methods for the examination of water and wastewater. Volume 3. Andesite Press. 138p.
- BARTELME, R.P.; OYSERMAN, B.O.; BLOM, J.E.; SEPULVEDA-VILLET, O.J.; NEWTON, R.J. 2018. Stripping away the soil: plant growth promoting microbiology opportunities in aquaponics. *Frontiers in Microbiology*. 9:8. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.00008>
- BARTELME, R.P.; SMITH, M.C.; SEPULVEDA-VILLET, O.J.; NEWTON, R.J. 2019. Component microenvironments and system biogeography structure microorganism distributions in recirculating aquaculture and aquaponic systems. *mSphere*. 3(4):143-19. <https://doi.org/10.1128/msphere.00143-19>
- BIROLO, M.; BORDIGNON, F.; TROCINO, A.; FASOLATO, L.; PASCUAL, A.; GODOY, S.; NICOLETTI, C.; MAUCIERI, C.; XICCATO, G. 2020. Effects of stocking density on the growth and flesh quality of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) reared in a low-tech aquaponic system. *Aquaculture*. 529:735653. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.735653>
- BRITTO, D.T.; KRONZUCKER, H.J. 2013. Ecological significance and complexity of N-source preference in plants. *Annals of Botany*. 112(6):957-963. <https://doi.org/10.1093/aob/mct157>
- CANFIELD, D.E.; GLAZER, A.N.; FALKOWSKI, P.G. 2010. The evolution and future of earth's nitrogen cycle. *Science*. 84(330):192-196. <https://doi.org/10.1126/science.1186120>
- CARRASQUERO FERRER, S.J.; PIRE SIERRA, M.C.; COLINA ANDRADE, G.; MAS Y RUBÍ, M.; MARTÍNEZ, D.; DÍAZ MONTIEL, A. 2014. Tasas de nitrificación y desnitrificación durante el tratamiento biológico de efluentes de tenerías en un reactor por carga secuencial. *Boletín del Centro de Investigaciones Biológicas*. 47(3):220-234.
- CASTELLANOS-ROZO, J.; RAMOS-PARRA, Y.J. 2015. Caracterización de bacterias oxidadoras de amonio aisladas del humedal de la planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad de Boyacá. I3+. 2(1):82-95. <https://doi.org/10.24267/23462329.78>
- CASTRO-GONZÁLEZ, M.; MOLINA-TRINCADO, V.; GÓMEZ-RAMÍREZ, E.; NARANJO-ROBAYO, N. 2023. Nitrous oxide production and microbial diversity in an aquaponic system. *AACL Bioflux*. 16(6):3032-3047.
- CAYCEDO LOZANO, L.; CORRALES RAMÍREZ, L.C.; TRUJILLO SUÁREZ, D.M. 2021. Las bacterias, su nutrición y crecimiento: una mirada desde la química. *Nova*. 19(36):49-94. <https://doi.org/10.22490/24629448.5293>
- CHANDRAPATI, S.; WILLIAMS, M.G. 2014. Total viable counts | Most Probable Number (MPN). In: Batt, C.A.; Tortorello, M.L. (Eds.). *Encyclopedia of Food Microbiology*. Second Edition. Academic Press. p.621-624. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384730-0.00333-5>
- CHAUHAN, A.; JINDAL, T. 2020. Biochemical and molecular methods for bacterial identification. In: Chauhan, A.; Jindal, T. *Microbiological methods for environment, food and pharmaceutical analysis*. Springer. p.425-468. https://doi.org/10.1007/978-3-030-52024-3_10
- FARGES, B.; POUGHON, L.; RORIZ, D.; CREULY, C.; DUSSAP, C.G.; LASSEUR, C. 2012. Axenic cultures of *Nitrosomonas europaea* and *Nitrobacter winogradskyi* in autotrophic conditions: a new protocol for kinetic studies. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 167(5):1076-1091. <https://doi.org/10.1007/s12010-012-9651-6>
- FERNÁNDEZ, A.; GARCIA DE LA FUENTE, C.; SAEZ, J.; VALDEZATE, S. 2010. Métodos de identificación bacteriana en el laboratorio de microbiología. *Seimc*. 9(1):1-28.
- FRENCH, E.; KOZLOWSKI, J.A.; MUKHERJEE, M.; BULLERJAHN, G.; BOLLMANN, A. 2012. Ecophysiological characterization of ammonia-oxidizing archaea and bacteria from freshwater. *Applied and Environmental Microbiology*. 78(16):5773-5780. <https://doi.org/10.1128/AEM.00432-12>
- GODDEK, S.; ESPINAL, C.A.; DELAIDE, B.; JIJAKLI, M.H.; SCHMAUTZ, Z.; WUERTZ, S.; KEESMAN, K.J. 2016. Navigating towards decoupled aquaponic systems: A system dynamics design approach. *Water*. 8:303. <https://doi.org/10.3390/w8070303>
- GYAMFI, S.; EDZIYIE, R.E.; OBIRIKORANG, K.A.; ADJEL-BOATENG, D.; SKOV, P.V. 2024. Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) show high tolerance to acute ammonia exposure

- but lose metabolic scope during prolonged exposure at low concentration. *Aquatic Toxicology*. 271:106932. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2024.106932>
- HERNÁNDEZ, E.; AGUIRRE, N.; PALACIO, J.; RAMÍREZ, J.J.; DUQUE, S.R.; GUISANDE, C.; ARANGUREN, N.; MOGOLLÓN, M. 2013. Evaluación comparativa de algunas características limnológicas de seis ambientes leníticos de Colombia. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*. 69:216-228. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.18151>
- KIM, B.H.; GADD, G.M. 2008. Bacterial physiology and metabolism. Cambridge University Press. United Kingdom. 512p. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511790461>
- KOOPS, H.P.; PURKHOLD, U.; POMMERENING-RÖSER, A.; TIMMERMAN, G.; WAGNER, M. 2006. The Lithoautotrophic Ammonia-Oxidizing Bacteria. In: Dworkin, M.; Falkow, S.; Rosenberg, E.; Schleifer, K.H.; Stackebrandt, E. (eds). *The Prokaryotes: A Handbook on the Biology of Bacteria*. 3rd ed., Volume 5, Proteobacteria: Alpha and Beta Subclasses. Springer. Germany. p.778-812.
- KOUKI, S.; SAIDI, N.; M'HIRI, F.; NASR, H.; CHERIF, H.; OUZARI, H.; HASSEN, A. 2011. Isolation and characterization of facultative mixotrophic ammonia-oxidizing bacteria from constructed wetlands. *Journal of Environmental Sciences*. 23(10):1699-1708.
- LAL, J.; VAISHNAV, A.; DEB, S.; KASHYAP, S.; DEBBARMA, P.; DEVATI, GAUTAM, P.; PAVANKALYAN, M.; KUMARI, K.; VERMA, D.K. 2024. Re-circulatory aquaculture systems: A pathway to sustainable fish farming. *Archives of Current Research International*. 24(5):799-810. <https://doi.org/10.9734/acri/2024/v24i5756>
- LEES, H.; QUASTEL, J.H. 1945. Bacteriostatic effects of potassium chlorate on soil nitrification. *Nature*. 155(3931):276-278. <https://doi.org/10.1038/155276A0>
- LI, P.; TONG, L.; LIU, K.; WANG, Y.; WANG, Y. 2009. Indole degrading of ammonia oxidizing bacteria isolated from swine wastewater treatment system. *Water Science & Technology*. 59(12):2405-2410. <https://doi.org/10.2166/wst.2009.312>
- LOVE, D.C.; FRY, J.P.; GENELLO, L.; HILL, E.S.; FREDERICK, J.A.; LI, X.; SEMMENS, K. 2014. An international survey of aquaponics practitioners. *PLoS One*. 9:1-10. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0102662>
- LOVE, D.C.; UHL, M.S.; GENELLO, L. 2015. Energy and water use of a small-scale raft aquaponics system in Baltimore, Maryland, United States. *Aquacultural Engineering*. 68:19-27. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2015.07.003>
- MAIER, R. 2000. Biogeochemical cycling. In: Maier, R.; Pepper, I.; Gerba, C. (eds). *Environmental Microbiology*. Academic Press. San Diego, USA. 585p.
- MASMELA-MENDOZA, J.E.; LIZARAZO-FORERO, L.M.; ARANGUREN RIAÑO, N.J. 2019. Bacterias nitrificantes cultivables de la zona limnética del lago de Tota, Boyacá. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*. 22(2):1378. <https://doi.org/10.31910/rudca.v22.n2.2019.1378>
- MEHRANI, M.J.; SOBOTKA, D.; KOWAL, P.; CIESIELSKI, S.; MAKINIA, J. 2020. The occurrence and role of *Nitrospira* in nitrogen removal systems. *Bioresource Technology*. 3:13-21.
- MUNGUÍA-FRAGOZO, P.; ALATORRE-JACOME, O.; RICO-GARCÍA, E.; TORRES-PACHECO, I.; CRUZ-HERNÁNDEZ, A.; OCAMPO-VELÁZQUEZ, R.V.; GARCÍA-TREJO, J.E.; GUEVARA-GONZÁLEZ, R.G. 2015. Perspective for Aquaponic Systems: "Omic" Technologies for Microbial Community Analysis. *BioMed Research International*. 2015:480386. <https://doi.org/10.1155/2015/480386>
- NISHIO, T.; SHINYA, M.; FUJIWARA, Y.; YOSHIKURA, T.; FUKUYAMA, J. 2008. Phosphate deficiency and its effect on nitrification in the pond of a sea-based solid waste disposal site. *Japanese Journal of Water Treatment Biology*. 44(3):139-148. <https://doi.org/10.2521/JSWTB.44.139>
- NISHIO, T.; SHINYA, Y.; YOSHIKURA, T.; FUKUYAMA, J. 2002. Effects of phosphate on nitrifying activity in a water treatment plant at low temperature. *Japanese Journal of Water Treatment Biology*. 38(1):21-28. <https://doi.org/10.2521/JSWTB.38.21>
- OLIVER, A.; LILLEY, A.K.; VAN DER GAST, C.J. 2012. Species-time relationships for bacteria. In: Franklin, R.; Mills, A. (eds). *Microbial Ecological Theory: Current Perspectives*. ASM Press. Washington, DC, USA. p.71-86.
- OWEN, A.; JONES, D. 2001. Competition for acids between wheat roots and rhizosphere microorganisms and the role of amino acids in plant N acquisition. *Soil Biology and Biochemistry*. 33(4-5):651-657. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(00\)00209-1](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00209-1)
- PAPP, B.; TÖRÖK, T.; SÁNDOR, E.; FEKETE, E.; FLIPPPI, M.; KARAFFA, L. 2016. High cell density cultivation of the chemolithoautotrophic bacterium *Nitrosomonas europaea*. *Folia Microbiologica*. 61(3):191-198. <https://doi.org/10.1007/s12223-015-0425-8>
- PROSSER, J.I. 1990. Autotrophic nitrification in bacteria. *Advances in Microbial Physiology*. 30:125-181. [https://doi.org/10.1016/S0065-2911\(08\)60112-5](https://doi.org/10.1016/S0065-2911(08)60112-5)

- RAMÍREZ SÁNCHEZ, L.M.; PÉREZ TRUJILLO, M.M.; JIMÉNEZ, P.; HURTADO GIRALDO, H.; GÓMEZ RAMÍREZ, E. 2011. Evaluación preliminar de sistemas acuapónicos e hidropónicos en cama flotante para el cultivo de orégano (*Origanum vulgare*: Lamiaceae). Revista Facultad de Ciencias Básicas. 7(2):242-259.
- SCHMAUTZ, Z.; ESPINAL, C.A.; BOHNY, A.M.; REZZONICO, F.; JUNGE, R.; FROSSARD, E.; SMITS, T.H. 2021. Environmental parameters and microbial community profiles as indication towards microbial activities and diversity in aquaponic system compartments. BMC Microbiology. 21:12. <https://doi.org/10.1186/s12866-020-02075-0>
- SOMERVILLE, C.; COHEN, M.; PANTANELLA, E.; STANKUS, A.; LOVATELLI, A. 2014. Small-scale aquaponic food production. Integrated fish and plant farming; FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy. 589p.
- SUJITH, P.P.; BHARATHI, P.A. 2011. Manganese oxidation by bacteria: biogeochemical aspects. In: Müller, W. (eds). Molecular Biomineralization. Progress in Molecular and Subcellular Biology. Volume 52. Springer. Berlin, Heidelberg. p.49-76. https://doi.org/10.1007/978-3-642-21230-7_3
- TORRES-MESA, A.; CIFUENTES-TORRES, L.; HURTADO-GIRALDO, H.; GOMÉZ-RAMÍREZ, E. 2023. Evaluation of plant-fish ratio in an aquaponic system with different stocking densities of *Cyprinus carpio* and *Carassius auratus*. AACL Bioflux. 16(1):606-615.
- UNDERHILL, S.E.; PROSSER, J.I. 1985. Inhibition of nitrification by potassium ethyl xanthate in soil and in liquid culture. Soil Biology and Biochemistry. 17(2):229-233. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(85\)90119-1](https://doi.org/10.1016/0038-0717(85)90119-1)
- VADIVELU, V.M.; KELLER, J.; YUAN, Z. 2007. Effect of free ammonia on the respiration and growth processes of an enriched *Nitrosomonas* culture. Water Research. 41(4):826-834. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2006.11.030>
- VERHAGEN, M.; LAANBROCK, J. 1991. Competition for limiting amounts of ammonium between nitrifying and heterotrophic bacteria in dual energy-limited chemostats. Applied and Environmental Microbiology. 57:3255-3263. <https://doi.org/10.1128/AEM.57.11.3255-3263.1991>
- WELCH, L.F.; SCOTT, A.D. 1959. Nitrification in nutrient solutions with low levels of potassium. Canadian Journal of Microbiology. 5(5):425-430. <https://doi.org/10.1139/M59-053>
- WONGKIEW, S.; POPP, B.N.; KHANAL, S.K. 2018. Nitrogen recovery and nitrous oxide (N₂O) emissions from aquaponic systems: influence of plant species and dissolved oxygen. International Biodeterioration & Biodegradation. 134:117-126. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2018.08.008>
- WONGKIEW, S.; POPP, B.N.; KIM, H.; KHANAL, S.K. 2017. Fate of nitrogen in floating-raft aquaponic systems using natural abundance nitrogen isotopic compositions. International Biodeterioration & Biodegradation. 125:24-32. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2017.08.006>
- YOUSUF, S.; KARLINSEY, J.E.; NEVILLE, S.L.; MCDEVITT, C.A.; LIBBY, S.J.; FANG, F.C.; FRAWLEY, E.R. 2020. Manganese import protects *Salmonella enterica* serovar Typhimurium against nitrosative stress. Metallomics (United Kingdom). 12(11):1791-1801. <https://doi.org/10.1039/d0mt00178c>
- ZERFAß, C.; CHRISTIE-OLEZA, J.A.; SOYER, O.S. 2018. Manganese oxide biomineralization is a social trait protecting against nitrite toxicity. BioRxiv 294975. 85(92):26. <https://doi.org/10.1128/AEM.02129-18>

Influence of the type of packaging and the hydrocolloid addition on the physico-chemical and sensory quality of soursop (*Annona muricata*) juice

Influencia del tipo de envase y la adición de hidrocoloides sobre la calidad físicoquímica y sensorial del jugo de guanábana (*Annona muricata*)

Denisse Margoth Zambrano-Muñoz¹ ; Jair Alexander González-Burgos¹ ; Karol Yannela Revilla-Escobar^{2*} ; Jhonnatan Placido Aldas-Morejón³ ; Roxanna Mercedes Zambrano-Muñoz⁴ ; Marcos Alberto Avilés-Miño⁵ ; Damaris Sanchez-Aguilera⁶ 

¹Universidad Técnica Estatal de Quevedo. Quevedo, Ecuador; e-mail: dzambranom@uteq.edu.ec, jairgonzales@uteq.edu.ec

²Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Sede Esmeraldas. Esmeraldas, Ecuador; e-mail: kyrevilla@puces.edu.ec

³Universidad Nacional de Cuyo, Facultad de Ciencias Aplicadas a la Industria. San Rafael, Argentina; e-mail: aldas.jhonnatan@uncuyo.edu.ar

⁴Plantaciones de Balsa Plantabal S.A - Km 4,5 Vía Valencia, Quevedo, Ecuador; e-mail: roxannazambrano1995@gmail.com

⁵Escuela Municipal de Quevedo. Quevedo, Ecuador; e-mail: marcosaviles52@gmail.com

⁶Independent Researcher. Ecuador. e-mail: damarissanchez4@gmail.com

*Corresponding author: kyrevilla@puces.edu.ec

How to cite: Zambrano-Muñoz, D.M.; González-Burgos, J.A.; Revilla-Escobar, K.Y.; Aldas-Morejón, J.P.; Zambrano-Muñoz, R.M.; Avilés-Miño, M.A.; Sánchez-Aguilera, D. 2025. Influence of the type of packaging and the hydrocolloid addition on the physico-chemical and sensory quality of soursop (*Annona muricata*) juice. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 28(1):e2721. <http://doi.org/10.31910/rudca.v28.n1.2025.2721>

Open access article published by Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, under a Creative Commons CC BY-NC 4.0 License.

Official publication of the Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, a Higher Education Institution Accredited of High Quality by the Ministry of National Education.

Received: June 28, 2024

Accepted: April 8, 2025

Edited by: Helber Adrián Arévalo Maldonado

ABSTRACT

Soursop is a tropical fruit valued for its unique flavor and beneficial health properties. Due to its pleasant taste and nutritional profile, it is used in the food industry to produce juices and nectars. However, during processing, it can present challenges due to the need to maintain suspension stability and the desired viscosity. This research evaluated the influence of packaging type and the addition of hydrocolloids on the physicochemical and sensory quality of soursop (*Annona muricata*) juice. A completely randomized factorial design A*B*C was used, where factor A = Type of stabilizer (xanthan gum, guar gum), Factor B = Percentage of fruit (14 -15 %), and Factor C = Type of container (glass or plastic). For the analysis of variance (ANDEVA), the free software InfoStat was used. The physicochemical results show that using gums does not affect the evaluated parameters such as pH, soluble solids, acidity, and density over time. Regarding sensory profile, treatment 3, which corresponds to xanthan gum, 14% pulp, and glass packaging, stood out in each organoleptic profile. In general terms, both Xanthan gum and Guar gum are beneficial for increasing stability and improving the sensory quality of soursop juice.

Keywords: Food products; Food analysis; Tropical fruit; Food preservation; Fruit processing

RESUMEN

La guanábana es una fruta tropical valorada por su sabor único con propiedades beneficiosas para la salud, por ende, en la industria alimentaria es utilizada en la producción de jugos y néctares debido a su agradable sabor y perfil nutricional. Sin embargo, su procesamiento puede presentar desafíos debido a la necesidad de mantener la estabilidad de la suspensión y la viscosidad deseada. Esta investigación evaluó la influencia del tipo de envase y la adición de hidrocoloides sobre la calidad físicoquímica y sensorial del jugo de guanábana (*Annona muricata*). Se empleó un diseño factorial completamente al azar A*B*C; donde factor A= tipo de estabilizante (goma xantana, goma guar), Factor B= porcentaje de fruta (14 -15 %) y Factor C= tipo de envase (vidrio o plástico). Para el análisis de varianza (ANDEVA), se utilizó el software libre InfoStat. Los resultados físicoquímicos demuestran que el uso de las gomas no afecta los parámetros evaluados como pH, sólidos solubles, acidez y densidad al transcurrir el tiempo. En cuanto al perfil sensorial el tratamiento 3, el cual corresponde a goma xantana, 14 % de pulpa y envase de vidrio se destacó en cada uno de los perfiles organolépticos. En términos generales, tanto la goma xantana y goma guar resultan beneficiosas para incrementar la estabilidad y mejorar la calidad sensorial del jugo de guanábana.

Palabras clave: Análisis de alimentos; Conservación de alimentos; Fruta tropical; Productos alimenticios; Procesamiento de frutas

INTRODUCTION

The international market has driven the evolution of a dynamic system in the production and consumption of fresh fruits, influenced by current demands and requirements (Lima Santos *et al.* 2023). This transformation is attributed to the physicochemical and nutritional properties of various tropical horticultural products, as well as to the bioactive compounds they have, which make them multifunctional foods with benefits for human health and, at the same time, attractive commercial characteristics (Casco Guerrero *et al.* 2024).

Worldwide, soursop (*Annona muricata* L.) is known as a fruit with a unique and pleasant flavor, making it ideal for juices, ice creams, and jellies. Additionally, soursop pulp does not undergo organoleptic changes when exposed to high temperatures (Ávila de Hernández *et al.* 2018). Due to the senescence process of the fruit, about 83.12-85.85% is marketed fresh (Coria-Téllez *et al.* 2018).

To improve the quality and extend the life of juices prepared from fruits such as soursop, stabilizers can be added such as xanthan gum, which is a natural polysaccharide produced by the fermentation of sugars, used in the food industry as a thickener and stabilizer, its aggregating effect in juices allows obtaining a consistent texture and avoiding the separation of liquids and solids (Castulovich & Franco, 2018). Moreover, the addition of guar gum to juices helps to maintain adequate viscosity and prevent sedimentation of suspended solids (Yen-Nhi *et al.* 2020).

In addition, the choice of the right packaging is fundamental in the juice industry, because it directly influences quality and life. The materials commonly used include plastic and glass materials (Matche, 2018). Among the plastic containers, those made of polyethylene terephthalate (PET) or high-density polyethylene (HDPE) offer lightness, durability, and flexibility in design. However, a drawback is its permeability to oxygen and its susceptibility to the migration of compounds into the container (Epure *et al.* 2023). In contrast, glass containers stand out for their barrier against gases, and their ability to preserve the sensory and nutritional quality of foods (Romero *et al.* 2021).

For this reason, the objective of this research was to evaluate the influence of the type of container and the addition of hydrocolloids on the physicochemical and sensory quality of soursop (*Annona muricata*) juice.

MATERIALS AND METHODS

The raw material used was purchased at the local market in the canton of Quevedo, located in the province of Los Ríos, Ecuador. The fruit was selected based on a visual analysis that indicated an adequate maturity index, thus guaranteeing its optimum quality for subsequent analysis, which was carried out in the Biotechnology laboratory, located at the “La María” Campus of the Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Quevedo, Ecuador.

Experimental Design and Statistical Analysis. A completely randomized design (CRD) with factorial arrangement A*B*C was used in this research, where factor A was the type of stabilizer (xanthan gum, guar gum), factor B was the percentage of fruit (14%, 15%), and factor C was the type of container (glass, plastic). The final product was evaluated in three periods at 15, 30, and 45 days.

For the analysis of variance (ANDEVA), the free software InfoStat was used to compare the means obtained in the treatments. Subsequently, a Tukey multiple range test with a $p \leq 0.05$ probability was applied to determine the significant differences between groups.

Process for the Preparation of Soursop Juice with the Addition of Xanthan Gum and Guar Gum. The pulping of the soursop was carried out by selecting ripe fruits with fleshy, white pulp, a pH of 4, and a sweet flavor, indicating an optimal state of maturity. Once the pulp was obtained, the main additives, such as stabilizers xanthan gum (0.008 g), guar gum (0.008 g), sugar (30.6 g), and soursop pulp (60.10 g) were received. After mixing the ingredients, the pasteurization process was carried out by heating the mixture at 63°C for 15 minutes to eliminate any pathogenic microorganisms present without altering its flavor or quality. Subsequently, it was packaged following the methodology established in the Ecuadorian Technical Standard INEN 2337 (2008) as requirements for the packaging of juices. The beverage was cooled to 30°C and finally stored at 9°C to preserve its freshness, flavor, and quality for a longer period.

Physicochemical Parameters of the Soursop Juice

pH determination. The pH content was determined in each of the three replicates, following the methodology established by the Ecuadorian Technical Standard INEN 0389 (1986a).

Determination of soluble solids. Soluble solids were measured by using a refractometer, placing a small sample of the juice in the lens (AOAC, 2012).

Acidity determination. The acidity of the soursop juice was determined by titration according to Ecuadorian Technical Standard NTE 0013 (1984), introducing 50 mL of distilled water and 10 mL of the sample in an Erlenmeyer flask and diluting the contents. Subsequently, a phenolphthalein solution (C₂H₁₄O₄) was added as an indicator, and the sample was then titrated with 0.1 N sodium hydroxide (NaOH). The final results were obtained by the following equation:

$$A = \frac{V(\text{NaOH}) * N(\text{NaOH}) * 0,067(\text{ácido málico})}{\text{Volumen de la muestra}}$$

where:

A: titratable acidity of the sample (malic acid as the predominant acid).

V(NaOH): volume of sodium hydroxide, in cm^3 .

N(NaOH): normality of sodium hydroxide (0.1 N).

Obtaining density. The density of the juice was determined by the pycnometer method, where the empty and dry pycnometer was weighed. Then, the pycnometer was filled with distilled water and the weight was recorded. Subsequently, the pycnometer was emptied and filled with the juice sample, and the weight was recorded again (NTE INEN 0391, 1986b).

Once the mass values were obtained, the density was calculated using the following equation:

$$\rho = \frac{m(\text{picnómetro} + \text{líquido}) - m(\text{picnómetro vacío})}{m(\text{picnómetro} + \text{agua}) - m(\text{picnómetro vacío})} * \rho(\text{agua})$$

Sensory characterization. The established treatments were evaluated by a total of 30 semi-trained panelists, who received a 10 ml sample for evaluation. The sensory evaluation was carried out using two tasting cards: one for the juices containing xanthan gum and the other for those containing guar gum. For the evaluation of sensory parameters, a 5-point hedonic scale was used for each profile: aroma, flavor, viscosity, and acceptability. A Friedman test was also applied (Ramírez-Navas, 2012).

RESULTS AND DISCUSSION

Physicochemical Characterization of Soursop Juice over Storage Time. Figure 1a shows the variability of the pH values evaluated at 15, 30, and 45 days. It can be seen that treatment 5 stood out with values of 4.20 and 4.28 at 15 and 30 days, respectively. However, treatment 6 showed the highest value at day 45. The treatments with guar gum showed pH values higher than 4, indicating that the juice has sufficient acidity to prevent the growth of microorganisms that can affect the product quality.

Based on the results obtained, it was observed that the treatments presented a slight, but not significant, decrease in pH as the days of storage elapsed. The authors Laz Mero *et al.* (2018) point out that hydrocolloids significantly affect pH, causing its decrease. This response was attributed to the encapsulating properties of hydrocolloids, which allow them to retain organic acids and other acidic substances, thus masking the beverage pH. As for other research on soursop pulp, Ojeda de Rodríguez *et al.* (2007) obtained average pH values of 4.1, which is similar to the value found in this research. It is important to indicate that pH, being a measure of the intensity of acid taste, is very important in controlling the development of microorganism populations. Previous studies such as those by Taiwo & Gift (2013) agree that the addition of hydrocolloids to juices, nectars, and fruit concentrates does not generate significant alterations.

Figure 1b shows the results of the soluble solids analyzed on days 15, 30, and 45, showing that the highest total solids content was obtained by treatment 5 on day 45 of storage with 10.60, while at the beginning of day 15, treatment 6 obtained the highest

result with 9.25. In general, all treatments showed values above 9, except treatments 3 and 4 with 8.80 and 8.85, respectively. It can be observed that the type of stabilizer influences the total solids, as does the type of container, with the glass container being more effective in preserving total solids. These values are related to the data obtained by Castulovich & Franco (2018) who reported a value of 8.0 in total solids in their study on the effect of stabilizers, and also noted no variability in total soluble solids during the evaluation period. Thus, it is possible to indicate that the use of xanthan gum and guar gum allows maintaining stable total soluble solids.

The acidity of the juice on day 15 was similar in treatments 2, 3, 4, and 5, and the treatments containing guar gum showed a slight increase on days 30 and 45 with values ranging between 0.21 and 0.25 (Figure 1c). The values found are related to those reported by Chuproski *et al.* (2020). Besides, these authors mention that the inclusion of stabilizers significantly influences acidity. Authors such as Macías Andrade *et al.* (2022) in their study on stability in orange and mandarin pulp established that by implementing 50% pulp plus xanthan gum, acidity remained favorable during the time evaluated.

Regarding the type of container, the acidity of the juice showed greater stability in the glass container, which was also reported by Crivelari-Da Cunha *et al.* (2020) who found that this characteristic was preserved in the glass containers for up to 12 months.

Density values are shown in Figure 1d, where it can be observed that by day 15, treatment 4 obtained a value of 1.06, which is higher than the other treatments. On the other hand, treatment 2 had a value of 1.10 on day 30 of storage, while on day 45, treatment 8 showed an increase of 1.10 on day 45. It is worth mentioning that the stabilizer Xanthan gum maintained the best results in the first 30 days. As described by Macías-Andrade *et al.* (2022), density can be influenced by a variety of factors in the pulp, such as acids, amino acids, enzymes, dissolved metals, and salts present in the pulp. In other research, such as that of Gutierrez Casiano *et al.* (2016), where they used the stabilizers carboxymethylcellulose (CMC) and xanthan gum, they mention that the density parameter remained stable during the storage period, which is consistent with the findings of this study.

Sensory Characterization of Soursop Juice. Table 1 shows the results of sensory evaluation of soursop juice, considering sensory categories such as aroma, flavor, viscosity, and acceptability.

Regarding the sensory category of aroma, significant differences were observed. The highest value was found in treatment 3, while the lowest values were observed in treatments 4 and 6. In the study by Contreras-Lozano *et al.* (2019) on the use of hydrocolloids as stabilizers in sweet corn and aloe vera gel beverages, they found that the sensory evaluation of aroma and flavor showed no significant differences with respect to the concentrations of xanthan gum and CMC, indicating that the predominant flavor and aroma in the beverage without stabilizers were characteristic of sweet corn.

Table 1. Sensory characterization of the evaluated treatments of soursop juice.

Treatments	Aroma	Flavor	Viscosity	Acceptance
T1	4.7±0.06 ^C	4.7 ± 0.06 ^D	4.2 ± 0.06 ^C	4.1 ± 0.06 ^{CD}
T2	4.2 ± 0.06 ^{ABC}	4.3 ± 0.05 ^{BCD}	4.7 ± 0.06 ^D	3.9 ± 0.06 ^{BC}
T3	4.8±0.06 ^C	4.4 ± 0.06 ^{CD}	5.0 ± 0.00 ^E	4.3 ± 0.25 ^D
T4	3.7 ± 0.06 ^A	3.7 ± 0.06 ^A	4.7 ± 0.15 ^D	3.8 ± 0.06 ^B
T5	4.0 ± 0.00 ^{AB}	4.3 ± 0.25 ^{BCD}	3.3 ± 0.06 ^A	4.1 ± 0.06 ^{CD}
T6	4.7±0.06 ^C	4.3 ± 0.06 ^{BCD}	4.3 ± 0.06 ^C	3.8 ± 0.06 ^B
T7	3.7 ± 0.06 ^A	4.0 ± 0.06 ^{AB}	3.9 ± 0.06 ^B	3.4 ± 0.06 ^A
T8	4.3 ± 0.15 ^{ABC}	4.0 ± 0.06 ^{AB}	4.2 ± 0.15 ^C	4.2 ± 0.06 ^D
p-value	0.004	0.001	0.001	0.001

Different letters show significant differences according to Tukey's test ($p < 0.05$).

T1: xanthan gum + 15 % pulp + glass container; T2: xanthan gum + 15 % pulp + plastic container; T3: xanthan gum + 14 % pulp + glass container; T4: xanthan gum + 14 % pulp + plastic container; T5: guar gum + 15 % pulp + glass container; T6: guar gum + 15 % pulp + plastic container; T7: guar gum + 14 % pulp + glass container; T8: guar gum + 14 % pulp + plastic container.

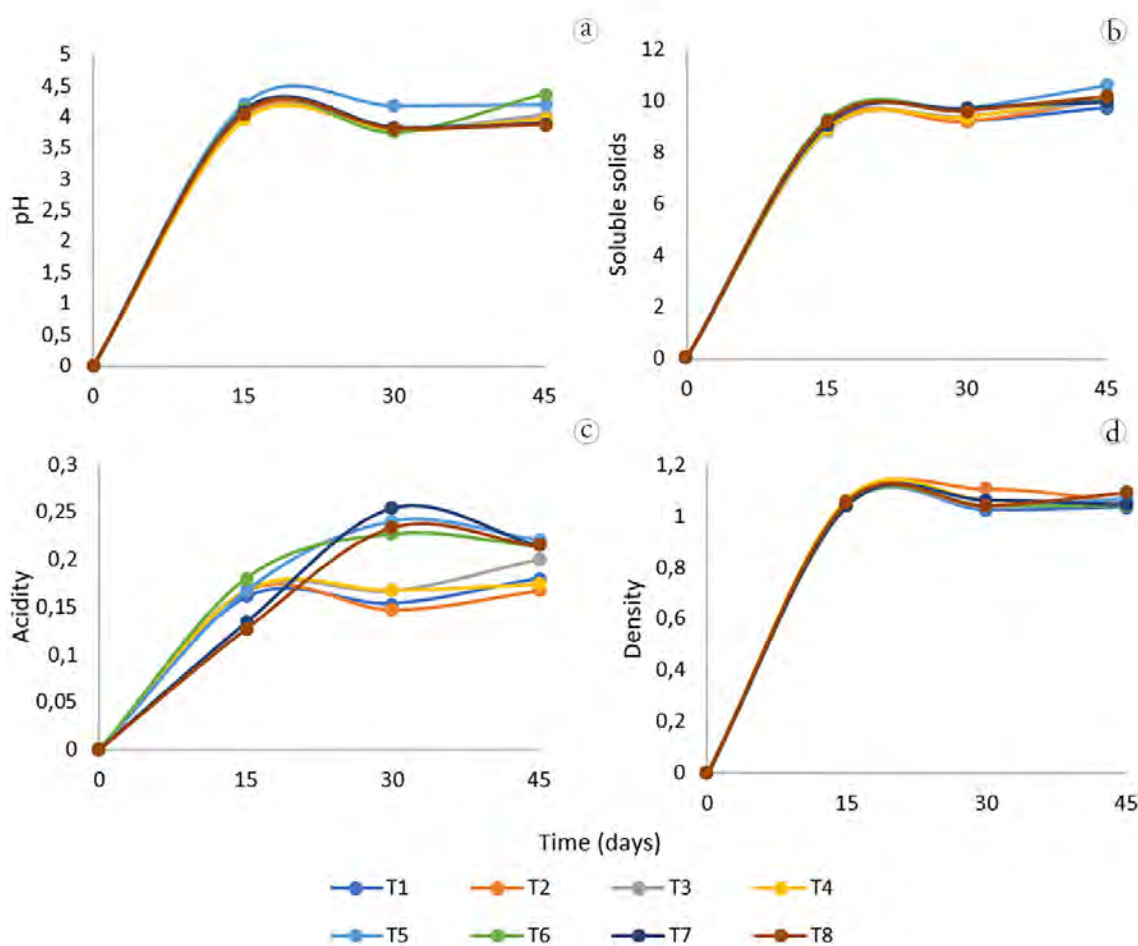


Figure 1. Results of the physicochemical analysis of soursop juice with the addition of different hydrocolloids and the use of different containers at 15, 30, and 45 days of storage. a) pH; b) total soluble solids; c) acidity; d) density.

T1: xanthan gum + 15 % pulp + glass container; T2: xanthan gum + 15 % pulp + plastic container; T3: xanthan gum + 14 % pulp + glass container; T4: xanthan gum + 14 % pulp + plastic container; T5: guar gum + 15 % pulp + glass container; T6: guar gum + 15 % pulp + plastic container; T7: guar gum + 14 % pulp + glass container; T8: guar gum + 14 % pulp + plastic container.

In the flavor category, a significant difference was found ($p<0.05$), where treatment 1 showed the highest valuation, while treatment 4 had the lowest valuation. Some authors such as Abedi *et al.* (2012) mentioned that hydrocolloids in concentrations no higher than 0.35% do not influence sensory properties, except for viscosity, which can be influenced. Thus, it can be noted that these types of hydrocolloids do not alter the flavor of soursop juice.

As for the viscosity parameter, a significant difference was observed ($p<0.05$), with treatment 3 obtaining the most representative value and treatment 5 the lowest score. This response has also been demonstrated in previous studies such as Contreras-Lozano *et al.* (2018) who indicated that hydrocolloids affect viscosity in beverages, indicating a rheological change in the product, due to its isotropic structure.

In terms of acceptability, a statistical difference ($p<0.05$) was found between treatments, where treatment 3 had the highest acceptance by tasters compared to treatment 7, which obtained the lowest score.

On the other hand, the glass container contributes favorably to a better preservation of beverages, which is due to the barrier generated and the compatibility with the juice which allows preserving the juices in a safe and stable way (Matche, 2018).

It is concluded that xanthan gum and guar gum generated significant improvements on the physicochemical stability and density uniformity of soursop juice. The guar gum treatments showed an adequate pH to prevent microbial growth, especially treatment 5.

In addition, an increase in soluble solids in the soursop juice was observed over time with the use of hydrocolloids, where treatment 5 reached the highest concentration at day 45. On the other hand, acidity varied between treatments and periods, with a tendency to higher values in the guar gum treatments.

It was also observed that both hydrocolloids are effective in the formulation of soursop juice without negatively altering the sensory characteristics of aroma, flavor, color, and acceptability. Therefore, xanthan gum and guar gum are recommended to improve the stability and sensory quality of soursop juice with different impacts depending on the formulation conditions employed.

Funding. This work was funded by Universidad Técnica Estatal de Quevedo, under the project "Influence of the Addition of Guar Gum and Xanthan Gum on the Physicochemical and Sensory Quality of Soursop (*Annona muricata*) Juice". **Conflicts of interest:** The manuscript was prepared and revised with the participation of all authors, who declare that there is no conflict of interest that would jeopardize the validity of the results presented. **Authors' contribution:** Denisse Margoth Zambrano Muñoz: Structuring of results analysis and validation of search equations; Jair Alexander González Burgos: Methodology structuring; Karol Yannela Revilla Escobar. Revilla Escobar: writing of results; Jhonnatan Placido

Aldas Morejon: editing and revision of the manuscript; Roxanna Mercedes Zambrano Muñoz: editing of the manuscript and validation of search equations; Damaris Sánchez Aguilera and Marcos Alberto Avilés Miño: creation of search equations.

REFERENCES

- ABEDI, F.; SANI, A.M.; KARAZHIYAN, H. 2012. Effect of some hydrocolloids blend on viscosity and sensory properties of raspberry juice-milk. *Journal of Food Science and Technology*. 51(9):2246-2250. <https://doi.org/10.1007/s13197-012-0705-0>
- ASSOCIATION OF OFFICIAL AGRICULTURAL CHEMISTS - AOAC. 2012. Official method of analysis. 19th edición. Volumen II. 646p.
- ÁVILA DE HERNÁNDEZ, R.; PÉREZ DE CAMACARO, M.; GIMÉNEZ, A.; HERNÁNDEZ CARABALLO, E. 2018. La guanábana: una materia prima saludable para la industria de alimentos y bebidas. *Revista Digital de Investigación y Postgrado*. 2(2):135-142.
- CASCO GUERRERO, E.C.; PAZMIÑO GUZMÁN, E.A.; HERRERA, M.S.; LEMA, N.; ROMERO, J.A.; YÁNEZ, D. 2024. Modelación matemática de la *Annona muricata* (Guanábana), para la industrialización y prevención del medio ambiente en el Ecuador. *Ciencia Latina*. 8(2):3443-3467. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i2.10770
- CASTULOVICH, B.; FRANCO, J. 2018. Efecto de agentes estabilizantes en jugo de piña (*Ananas comosus*) y coco (*Cocos nucifera* L.) edulcorado. *Prisma Tecnológico*. 9(1). <https://doi.org/10.33412/pri.v9.1.2063>
- CHUPROSKI, A.; DE FATIMA PEREIRA, G.; LOS, P.R.; JUDACEWIKI, P.; SILVA SIMÕES, D.R.; SANTOS SALEM, R.D. 2020. Desenvolvimento e avaliação de iogurte adicionado de colágeno e goma xantana. *Revista Brasileira de Investigaciones Animales y Ambientales*. 3(4):3579-3589. <https://doi.org/10.34188/bjaerv3n4-065>
- CONTRERAS-LOZANO, K.P.; CIRO-VELÁSQUEZ, H.J.; ARANGO-TOBÓN, J.C. 2019. Hidrocoloides como estabilizantes en bebidas de maíz dulce (*Zea mays* var. saccharata) y gel de aloe vera (*Aloe barbadensis* Miller). *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*. 22(2):e1090. <https://doi.org/10.31910/rudca.v22.n2.2019.1090>
- CONTRERAS-LOZANO, K.P.; CIRO-VELÁSQUEZ, H.J.; MÁRQUEZ-CARDOZO, C.J. 2018. Effect of the addition of hydrocolloids and aloe vera gel (*Aloe barbadensis* Miller) on the rheological properties of a beverage of sweet corn (*Zea mays* var. saccharata). *DYNA*. 85(204):302-310. <https://doi.org/10.15446/dyna.v85n204.63205>

- CORIA-TÉLLEZ, A.V.; MONTALVO-GÓNZALEZ, E.Y.; YAHIA, E.M.; OBLEDO-VÁSQUEZ, E.N. 2018. *Annona muricata*: A comprehensive review on its traditional medicinal uses, phytochemicals, pharmacological activities, mechanisms of action and toxicity. *Arabian Journal of Chemistry*. 11(5):662-691. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2016.01.004>
- CRIVELARI-DA CUNHA, M.; SANTOS-SILVA, J.; SUOSA-GUIMARES, J.; NUNES-CARVALHO, E.E.; BARROS-VILAS, E.V. 2020. Effect of processing, storage and type of glass packaging on the quality of jelly produced from a Brazilian Cerrado fruit. *Food Science and Technology*. 40(2):661-668. <https://doi.org/10.1590/fst.38419>
- EPURE, E.L.; COJOCARU, F.D.; ARADOAEI, M.; CIOBANU, R.C.; DODI, G. 2023. Exploring the surface potential of recycled polyethylene terephthalate composite supports on the collagen contamination level. *Polymers*. 15(3):776. <https://doi.org/10.3390/polym15030776>
- GUTIERREZ CASIANO, N.; VERA G., V.; CANSECO LÓPEZ, A.M.; MARTÍNEZ J., V.; HERNÁNDEZ GUEVARA, O.; ORTIZ SÁNCHEZ, C.A. 2016. Evaluación del proceso de obtención del néctar de manzana golden delicious (*Malus domestica*) a partir de dos métodos de conservación: pasteurización – vacío. *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos*. 1(1):680-685.
- INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN – INEN. 1984. Determinación de acidez titulable. Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 0013. Quito. Disponible desde Internet en: <https://ia801901.us.archive.org/31/items/ec.nte.0013.1984/ec.nte.0013.1984.pdf>
- INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN - INEN. 1986a. Conservas vegetales. Determinación de la concentración del ión hidrógeno (pH). Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 0389, Quito. Disponible desde Internet en: <https://archive.org/details/ec.nte.0389.1986>
- INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN- INEN. 1986b. Conservas vegetales. Jugos de frutas. Determinación de la densidad relativa. Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 0391. Quito. Disponible desde Internet en: <https://archive.org/details/ec.nte.0391.1986/page/n1/mode/2up>
- LAZ MERO, M.L.; TUÁREZ PARRAGA, M.A.; BERMELLO OCHOA, J.; DÍAZ CAMPOZANO, E.G. 2018. Evaluación fisicoquímica en jugo de maracuyá con diferentes concentraciones de hidrocoloides. *Espamciencia*. 10(1):119-123.
- LIMA SANTOS, I.; CRUZ RODRIGUEZ, A.M.; AMANTE, E.R.; MELLER DA SILVA, L.H. 2023. Soursop (*Annona muricata*) properties and perspectives for integral valorization. *Foods*. 12(7):12071448. <https://doi.org/10.3390/foods12071448>
- MACÍAS ANDRADE, E.F.; DEMERA LUCAS, F.M.; ZAMBRANO MENDOZA, L.A.; SACÓN-VERA, E.F.; SALTOS SOLORZANO, J.V.; ZAMBRANO MENDOZA, B.A. 2022. Estabilidad de néctar mix de pulpa de naranja (*Citrus sinensis*) y mandarina (*C. reticulata*) con goma xanthan y cmc. *La Técnica. Revista de las Agrociencias*. 12(1):32-37. https://doi.org/10.33936/la_tecnica.v0i27.3897
- MATCHE, R.S. 2018. Chapter 32 - Packaging technologies for fruit juices. En: Rajauria, G.; Tiwari, B.K. *Fruit Juices. Extraction, composition, quality and analysis*. Academic Press. p.637-666. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802230-6.00032-1>
- NHI, T.T.; TAN PHAT, D.; VÃN THỊNH, P.; NGUYEN NHAN, Q.; HUYNH NGOC, T.T.; THANH TRUC, T. 2020. Formulation for a soursop (*Annona muricata* L.) nectar supplement using response surface methodology for optimization of food thickener. *IOPscience*. 991:012061. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/991/1/012061>
- OJEDA DE RODRIGUEZ, G.J.; CORONADO, J.; NAVA, R.; SULBARAN, B.; ARAUJO, D.; CABRERA, L. 2007. Caracterización fisicoquímica de la pulpa de la guanábana (*Annona muricata* L.) cultivada en el occidente de Venezuela. *Boletín de Investigaciones Biológicas*. 41(2):152-160.
- RAMÍREZ-NAVAS, J.S. 2012. Análisis sensorial: pruebas orientadas al consumidor. *Revista ReCiTel*. 12(1):83-102.
- ROMERO, A.; CASTRO, O.; CALLES, T.; CÁCERES, C.; FERNÁNDEZ, H.; MACÍAS, Y.; BECKFORD, Y.; BANDA, J. 2021. Envases de vidrio. *Revista Semilla Científica*. 2:129-139.
- TAIWO, A.C.; GIFT, N.O. 2013. Studies on the addition of hydrocolloids to tomato-carrot juice blend. *Journal of Nutrition & Food Sciences*. 45(10):2127-2133. <https://doi.org/10.4172/2155-9600.1000212>



Isotermas de adsorción y propiedades termodinámicas en harina de tarwi (*Lupinus mutabilis*)

Adsorption isotherms and thermodynamic properties in tarwi (*Lupinus mutabilis*) flour

Santos Martín Briceño-Sevillano¹ ; Lubberto Marceliano-Sánchez² ; Rodolfo Moisés Vegas-Niño^{2*}

¹Programa Nacional de Alimentación Escolar - Qali Warma. Cajabamba, Perú; e-mail: santos.briceno@qw.gob.pe

²Universidad Nacional de Trujillo. Huamachuco, Perú; e-mail: lmarceliano@unitru.edu.pe, rvegas@unitru.edu.pe

*autor de correspondencia: rvegas@unitru.edu.pe

Cómo citar: Briceño-Sevillano, S.M.; Marceliano-Sánchez, L.; Vegas-Niño, R.M. 2025. Isotermas de adsorción y propiedades termodinámicas en harina de tarwi (*Lupinus mutabilis*). Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 28(1):e2540. <http://doi.org/10.31910/rudca.v28.n1.2025.2540>

Artículo de acceso abierto publicado por Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, bajo una Licencia Creative Commons CC BY-NC 4.0

Publicación oficial de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Institución de Educación Superior Acreditada en Alta Calidad por el Ministerio de Educación Nacional

Recibido: enero 23 de 2024

Aceptado: junio 10 de 2025

Editado por: Helber Adrián Arévalo Maldonado

RESUMEN

En Perú, el tarwi (*Lupinus mutabilis*) se comercializa principalmente como grano entero, su conversión en harina es limitada y casi nula como harina desgrasada o hidrolizada. Aunque es rico en proteínas y lípidos, su valorización en el mercado peruano sigue siendo baja. Las isotermas de sorción son herramientas fundamentales para estudiar procesos, como secado, mezcla, permeabilidad y envasado, permitiendo predecir la estabilidad fisicoquímica de los alimentos. En este estudio se evaluaron por gravimetría, las isotermas de sorción de harinas de tarwi, en tres condiciones: deslupinizada (1), desgrasada (2) e hidrolizada (3), junto con sus propiedades termodinámicas. Las muestras se expusieron a actividades de agua (a_w), entre 0,1 y 0,9 y a temperaturas de 20, 30 y 40 °C. Los datos obtenidos fueron ajustados mediante el modelo GAB (Guggenheim, Anderson y de Boer). Se analizaron parámetros, como calor isostérico (Q_{st}), superficie de adsorción (A_s), entropía de sorción (ΔS) y energía libre de Gibbs (ΔG). Se observó que al aumentar la a_w , también lo hizo la humedad de equilibrio (X_m), mientras que para una a_w constante, el aumento de temperatura redujo X_m . Las isotermas mostraron una forma sigmoidal tipo II. Los mayores valores de Q_{st} se registraron en la harina hidrolizada. Los valores de monocapa y área superficial fueron mayores a 20 °C, en todos los casos; además, la harina condición en 2 tuvo los máximos valores, con 0,087 g H₂O/g m.s. y 308,86 m²/g m.s., respectivamente, mientras que ΔG indicó espontaneidad en los procesos para condiciones 2 y 3.

Palabras clave: Calor isostérico; Isoterma GAB; Seguridad alimentaria; Semilla de leguminosa; Superficie de adsorción.

ABSTRACT

In Peru, Andean lupin (*Lupinus mutabilis*) is marketed primarily as a whole grain, its conversion into flour is limited and almost nonexistent as defatted or hydrolyzed flour. Although it is rich in proteins and lipids, its market value in Peru remains low. Sorption isotherms are fundamental tools for studying processes such as drying, mixing, permeability, and packaging, allowing for the prediction of the physicochemical stability of foods. In this study, the sorption isotherms of tarwi flours were evaluated gravimetrically under three conditions: delupinized (1), defatted (2), and hydrolyzed (3), along with their thermodynamic properties. The samples were exposed to water activities (a_w) ranging from 0.1 to 0.9 and 20, 30, and 40 °C temperatures. The data obtained were fitted using the GAB model (Guggenheim, Anderson, and de Boer). Parameters such as isosteric heat (Q_{st}), adsorption surface area (A_s), sorption entropy (ΔS), and Gibbs free energy (ΔG) were analyzed. It was observed that as a_w increased, so did the equilibrium humidity (X_m), while for a constant a_w , increasing temperature reduced X_m . The isotherms displayed a type II sigmoidal shape. The highest Q_{st} values were recorded in the hydrolyzed flour. The monolayer and surface area values were greater at 20 °C in all cases; in addition, flour in condition 2 had the highest values with 0.087 g H₂O/g d.m. and 308.86 m²/g d.m., respectively, while ΔG indicated spontaneity in the processes for conditions 2 and 3.

Keywords: Adsorption surface; Food security; GAB isotherm; Isosteric heat; Legume seed.

INTRODUCCIÓN

El tarwi (*Lupinus mutabilis* Sweet) es una leguminosa originaria de la región andina de Perú, Bolivia y Ecuador. Se ha cultivado desde la época preinca (Gulisano *et al.* 2019) y desempeña un papel fundamental en la alimentación y economía de las poblaciones indígenas de esta región.

La Libertad es la mayor productora de tarwi en Perú, con una representación del 32 %, a nivel nacional (Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego, 2023). El tarwi es la única especie del género *Lupinus* que ha sido domesticada y cultivada en América del Sur (Simioniuc *et al.* 2021), lo que lo convierte en un recurso de gran importancia para la seguridad alimentaria. Las semillas del tarwi destacan por su contenido de proteínas (44 %) (Czubinski *et al.* 2021). Además, tienen entre un 14 y 24% de lípidos (Gross *et al.* 1988), aunque se reportan concentraciones de lípidos entre 13,6 y 18,6% (Berru *et al.* 2021). Asimismo, poseen concentraciones importantes de calcio, fibra, hierro, zinc y son libres de gluten. Debido a estas cualidades nutricionales, el consumo del tarwi se considera estratégico, especialmente, para madres lactantes y niños en desarrollo, como una de las alternativas en la lucha contra la desnutrición infantil (Carvajal-Larenas *et al.* 2016).

La inclusión del tarwi en la dieta del ser humano no solo previene, sino que también contribuye al tratamiento de enfermedades metabólicas, como la obesidad, la diabetes y las cardiovasculares, además, de su notable potencial industrial en la producción de alimentos procesados o semiprocados (Chalampunte-Flores *et al.* 2023). Se reporta que la harina de tarwi es utilizada en la elaboración de productos alimenticios, tales como pan, pasteles, galletas, bizcochos, fideos, sopas instantáneas y embutidos, lo que la convierte en una excelente alternativa para personas con intolerancia al gluten, como aquellos que padecen la enfermedad celíaca (Córdova-Ramos *et al.* 2020; Karoui *et al.* 2023).

Durante el almacenamiento, los alimentos secos entran en contacto con el entorno circundante, lo que da lugar al intercambio de humedad y calor. Este proceso conlleva variaciones en la temperatura y la humedad del grano (Novoa, 2019). Estas fluctuaciones de energía y humedad relativa pueden desencadenar reacciones que afecten negativamente su calidad (Abati *et al.* 2021; Lancelot *et al.* 2021), por lo tanto, resulta fundamental llevar a cabo la caracterización y la predicción del efecto de factores externos, como la temperatura y la humedad relativa, en el comportamiento de absorción de agua en varias formas de harina de tarwi, utilizando modelos termodinámicos. Las propiedades termodinámicas de los alimentos ofrecen información importante para predecir su comportamiento durante su almacenamiento (Rosa *et al.* 2010).

Los modelos de isoterma de sorción desempeñan un papel relevante en la preservación de la calidad de los alimentos (especialmente, los secos), al permitir comprender la relación entre el contenido de humedad y la actividad del agua (García *et al.* 2008). Entre estos modelos, destaca el modelo GAB (Guggenheim, Anderson y de Boer), que demuestra una excelente capacidad para describir los datos experimentales en un amplio rango de a_w (0,1 – 0,9); por lo tanto, es ampliamente utilizado en la industria de alimentos para predecir la humedad en equilibrio durante el almacenamiento (Lewicki, 1997; Alamri *et al.* 2018). Por

su parte, el calor isostérico de sorción permite una comprensión del estado del agua y su afinidad por la superficie del alimento, mientras que la entropía de sorción diferencial se asemeja a los sitios de sorción, disponibles en niveles de energía específicos (Esfe *et al.* 2023).

La relación entre estas propiedades y la entalpía puede ser establecida mediante la teoría de la compensación, que refleja la fuerza impulsora detrás del proceso de sorción de humedad y la naturaleza del proceso (Chen *et al.* 2023). Estudios, como los de McMinn & Magee (2003), McMinn *et al.* (2005), Martín-Santos *et al.* (2012), Ayala Aponte (2016), Wan *et al.* (2018), Azhar *et al.* (2021), Ouabou *et al.* (2021) y Cheng *et al.* (2023) han llevado a cabo la caracterización y modelado del comportamiento de productos alimentarios durante el almacenamiento, en diversas condiciones.

Por lo tanto, este estudio se centró en evaluar cómo la temperatura y la humedad relativa afecta a las isothermas de sorción de humedad y a las propiedades termodinámicas de diferentes tipos de harina de tarwi, como la deslupinizada, desgrasada e hidrolizada por proteasa, teniendo en cuenta que la harina deslupinizada podría ser empleada como insumo en la sustitución parcial de panes, galletas y barras energéticas; la harina desgrasada, para fideos y batidos instantáneos y la harina hidrolizada, para fórmulas infantiles y personas de avanzada edad, por su mayor digestibilidad.

MATERIALES Y MÉTODOS

Acondicionamiento de harina de *Lupinus mutabilis*. Se preparó harina de tarwi (variedad “Alta Gracia”) en tres condiciones, identificadas como tipo 1, tipo 2 y tipo 3 y luego de su preparación fueron envasadas en recipientes herméticos.

La harina tipo 1, se obtuvo a partir de tarwi deslupinizado (eliminación de alcaloides por lixiviación con agua por ocho días, previa cocción del grano), el cual, se transformó en pasta, con un triturador casero, adicionando agua purificada, en relación tarwi: agua de 1:3 (p/p); luego, se sometió a un secado en estufa a 45 °C, por 48 h, en bandejas de acero inoxidable y, posteriormente, se procedió a reducir el tamaño de las partículas a $\leq 1,0$ mm.

Para la obtención de harina tipo 2, se utilizó como base la de tipo 1. Esta última fue desgrasada en un extractor Soxhlet, empleando etanol de 96° GL. Posteriormente, se secó en estufa a 45 °C, durante 24 h y luego se trituró, a un tamaño de partícula $\leq 1,0$ mm.

Para la obtención de harina tipo 3, se utilizó como base la de tipo 2, mediante un proceso de hidrólisis, utilizando una proteasa de *Bacillus* sp. (Protamex®). Las condiciones de hidrólisis fueron pH 7,0 y temperatura 34 °C, por 8 horas. La concentración de enzima aplicada fue de 0,3 g por cada 50 g de sustrato, con una concentración de harina en la solución del 0,33 %. Una vez finalizada la hidrólisis, la harina se sometió a secado, trituración y tamizado, para obtener partículas $\leq 1,0$ mm.

Determinación de las isothermas de sorción de humedad. Las isothermas de sorción de las harinas de tarwi se construyeron para un

intervalo de a_w de 0,1 – 0,9 y temperaturas de 20, 30 y 40 °C. Los valores de a_w se acondicionaron con soluciones de H_2SO_4 (Bhandari & Adhikari, 2008), como se detalla en la tabla 1.

Estas soluciones se dispusieron en envases de vidrio de 1.000 cm³, con cierre hermético, en una cantidad de 100 g de solución. En

cada uno de ellos, se colocó un vaso de vidrio conteniendo un vaso más pequeño con la muestra de harina, en una cantidad de ≈1 g. Luego, se dispuso en ambientes a 20, 30 y 40 °C, por 7 días (peso constante), para su posterior análisis gravimétrico.

Tabla 1. Concentraciones de ácido sulfúrico (% p/p) que, a diversas temperaturas (20, 30 y 40°C), permiten obtener distintos valores de actividad de agua (a_w).

Temperatura (°C)	a_w								
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
	% H_2SO_4								
20	70,9	58,2	53,2	48,3	43,3	37,9	31,4	24,9	18,5
30	72,6	58,5	53,5	48,5	43,6	38,1	31,6	25,0	18,5
40	74,3	58,9	53,9	48,8	43,8	38,3	31,7	25,1	18,4

Ajuste al modelo de GAB. Los datos experimentales de humedad en equilibrio en función a la actividad de agua fueron modelados, empleando la ecuación de GAB (Ecuación 1).

$$X_m = \frac{X_0 \cdot C_G \cdot K_G \cdot a_w}{(1 - K_G \cdot a_w)(1 - K_G \cdot a_w + C_G \cdot K_G \cdot a_w)} \quad \text{ecuación 1}$$

En la que, X_m representa la humedad en equilibrio a una determinada actividad de agua (a_w) y depende de la temperatura; X_0 representa el valor de monocapa y C_G y K_G son las constantes cinéticas de absorción de humedad en la monocapa, como en la multicapa, respectivamente.

Los tres parámetros del modelo de GAB (X_0 , C_G y K_G) fueron determinados a través de una regresión cuadrática, empleando el programa Excel. Se determinó, además, el coeficiente de determinación (R^2) y el error medio relativo (EMR) (Maftoon Azad *et al.* 2023) (Ecuación 2):

$$EMR = \left[\frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{X_m^* - X_m}{X_m^*} \right) \right] \quad \text{ecuación 2}$$

donde X_m^* y X_m representan el contenido de agua en equilibrio experimental y predicho por la ecuación de GAB, respectivamente; N es la cantidad de observaciones.

Cuantificación del calor isostérico de sorción. El calor isostérico de sorción (Q_{st}) representa la cantidad de energía que se libera durante el proceso de sorción de moléculas de agua por una superficie adsorbente, constituyendo un referente de la condición del agua absorbida por la matriz sólida (Panigrahi *et al.* 2022). Se relaciona Q_{st} con el calor isostérico neto de sorción (q_{st}) al sumarle a éste, el calor latente de vaporización del agua ($L_v = 43$ kJ/mol), a la temperatura del sistema que se esté trabajando (Moreira *et al.* 2008). Esto se presenta en la ecuación 3.

$$Q_{st} = q_{st} + L_v \quad \text{ecuación 3}$$

q_{st} cuantifica la energía que se requiere en producir un cambio de estado de líquido a vapor de una unidad de masa, ocurriendo estos a

temperatura y actividad de agua constantes (Mallek-Ayadi *et al.* 2020). Su determinación es a través del modelo de Clausius-Clapeyron (Ecuación 4), diagramando $\ln(a_w)$ vs $1/T$ (Kelvin) (López-Vidaña *et al.* 2021).

$$\ln(a_w) = -\left(\frac{q_{st}}{T}\right)\left(\frac{1}{T}\right) + C \quad \text{ecuación 4}$$

Donde, q_{st} es el calor isostérico neto de sorción (J/mol); T es la temperatura absoluta (K); R es la constante de los gases (8,314 J/mol.K) y C una constante de integración, que depende del contenido de humedad en el material.

Determinación de la superficie de adsorción. La superficie de adsorción se correlaciona con las propiedades de retención de agua de los alimentos; mientras mayor sea su valor, mayor será el agua que el alimento pueda absorber (Arslan-Tontul, 2020). El área superficial de adsorción de las muestras fue determinada con la ecuación 5 (Fan *et al.* 2015), empleando el valor de monocapa obtenido mediante el modelo GAB.

$$A_s = \frac{X_0 \cdot N_A \cdot A_{H_2O}}{M_{H_2O}} = 3,53 \cdot 10^3 \cdot X_0 \quad \text{ecuación 5}$$

Donde, A_s es el área superficial de adsorción (m²/g b.s.); X_0 es el contenido de humedad de la monocapa (g agua/g m.s.); N_A es el número de Avogadro ($6,02 \times 10^{23}$ moléculas/mol)/g; A_{H_2O} es el área de la molécula de agua ($1,06 \times 10^{-19}$ m²) y M_{H_2O} es el peso molecular del agua (18 g/mol).

Determinación de la entropía de sorción. El cambio de entropía en sistemas alimentarios es importante en el análisis energético de su procesamiento, porque es proporcional al número de sitios de sorción disponibles en un nivel de energía específico (Koua *et al.* 2014). La entropía diferencial de sorción (ΔS) fue determinada según ecuación 6:

$$\ln(a_w) = -\left(\frac{q_{st}}{RT}\right) + \frac{\Delta S}{R} \quad \text{ecuación 6}$$

ΔS se obtiene graficando $\ln(a_w)$ y $1/T$ para determinado contenido de humedad, donde la intersección con el eje Y ($\ln(a_w)$) representa $\Delta S/R$.

Determinación de la energía libre de Gibbs. El cambio en la energía libre de Gibbs (ΔG) se utiliza para evaluar la afinidad del material adsorbente por las moléculas de agua, brindando información de si el proceso es espontáneo o no (Sánchez-Torres *et al.* 2021). Su cuantificación se realiza mediante la ecuación 7, para cada temperatura (Fakhfakh *et al.* 2018).

$$\Delta G = q_{st} - T \cdot \Delta S^0 \quad \text{ecuación 7}$$

Análisis estadístico. Se realizó un análisis de varianza (ANOVA), con un nivel de significancia del 95 %, sobre los valores de monocapa, para determinar el efecto de la temperatura. Se aplicó una prueba de comparaciones múltiples (LSD) para determinar la diferencia de grupos en función a la temperatura. Para esto se empleó el programa estadístico libre R.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Isotermas de sorción de harinas de tarwi. En la figura 1, se presentan las isotermas de adsorción de humedad de equilibrio de los tres tipos de harina de tarwi a las temperaturas estudiadas (20, 30 y 40 °C). En ellas, se observa que el contenido de humedad de equilibrio de las harinas disminuyó al incrementar la temperatura para una a_w constante. Este fenómeno se puede explicar por el hecho de que el incremento de temperatura lleva consigo un aumento en la cantidad de energía y la actividad de las moléculas de agua. Como consecuencia, el movimiento molecular se torna más rápido y las distancias intermoleculares son mayores. Entonces, las moléculas de agua disminuyen su estabilidad, con lo que se desprenden más fácilmente de los sitios de unión con las moléculas de los alimentos; este fenómeno también fue reportado por Arslan-Tontul (2020). Además, la modificación de los sitios activos ocasionada al incrementar la temperatura conlleva a una disminución de sitios activos disponibles para la adsorción de moléculas de agua (Li *et al.* 2021).

Asimismo, se observa que, independientemente de las temperaturas, en las tres condiciones de harina, la humedad de equilibrio se tiende a incrementar lentamente, al aumentar la actividad de agua y, a partir de $a_w > 0,6$, los valores de X_m crecen bruscamente. Las isotermas presentaron una forma sigmoidal con un comportamiento tipo II, según la clasificación de Brunauer *et al.* (1940). Otros autores, como Arslan-Tontul (2020), Mallek-Ayadi *et al.* (2020), Penteadó Rosa *et al.* (2021), Koç & Erbaş (2022), Dushkova *et al.* (2023) y Maftoon Azad *et al.* (2023) reportan que este comportamiento de las isotermas resulta muy común en productos de origen biológico, como las frutas, semillas y cereales.

Según Toğrul & Arslan (2007), la isoterma de sorción de humedad se divide en tres partes, que dependen del intervalo de la actividad de agua; esta división lleva a una zona A (a_w : 0 – 0,2), una zona B (a_w : 0,2 – 0,7) y una zona C (a_w : 0,7 – 1,0). La zona A de la isoterma es escenario de la adsorción de monocapa, donde el agua

molecular se encuentra fuertemente unida a los sitios polares de la matriz alimentaria, mediante enlaces de hidrógeno (Li *et al.* 2021). Los resultados de esta investigación muestran que en la zona A se presentaron valores de monocapa, donde el agua molecular se une al contenido crítico de humedad, generando una excelente estabilidad de almacenamiento de las harinas.

En la zona B, se evidenció una correlación casi lineal entre la humedad de equilibrio y la actividad de agua, atribuible a las transformaciones estructurales inducidas en la matriz alimentaria y a la interacción del agua con los componentes del alimento (Arslan-Tontul, 2020). En esta fase, se llevó a cabo un proceso de adsorción en múltiples capas, durante el cual, las moléculas de agua se organizaron secuencialmente para ocupar los microporos presentes en la estructura del alimento. De manera análoga a lo observado en la región A, el agua adsorbida, en esta etapa, no se encuentra en estado libre, lo que restringe su disponibilidad para participar en reacciones bioquímicas.

En la zona C, las moléculas de agua tienden a penetrar en los poros y quedan atrapadas de forma mecánica en el espacio vacío y, posteriormente, logran condensarse en agua líquida. El agua de esta zona se conoce como agua libre y las moléculas de agua son lo suficientemente activas como para participar en la reacción bioquímica y microbiológica (Sawhney *et al.* 2011). Con una actividad del agua superior a 0,6, un leve incremento en la actividad del agua llevó a que la adsorción sea mayor; esto indica, que en $a_w > 0,6$ las harinas se tornan inestables y son muy susceptibles al deterioro.

Los procesos de sorción están relacionados estrechamente con la composición y la estructura química del material. En el tratamiento realizado a $T = 40$ °C ($a_w = 0,9$), se obtuvo una adsorción de agua de 0,31, 0,29 y 0,13 g H₂O/g sólido (m.s.) en las harinas tipo 1, 2 y 3, respectivamente, lo que sugiere que, al desgrasar e hidrolizar la proteína, la harina de tarwi se torna menos higroscópica. Aunque, la harina con la proteína entera presentó una adsorción cercana a la harina sin desgrasar.

Estos resultados siguen siendo superiores a otros productos, como la quinua, con 0,16 g H₂O/g sólido (m.s.) (Arslan-Tontul, 2021), en condiciones de a_w altas (0,9) y temperatura de 35 °C. La baja adsorción de la harina tipo 3 se puede explicar por el hecho de que la hidrofobicidad superficial de los hidrolizados se incrementa, pues la hidrólisis de los enlaces peptídicos en las proteínas incrementa el número de sitios hidrofóbicos al exponer el interior de las proteínas (Jo *et al.* 2020). Durante la hidrólisis, la degradación enzimática de proteínas implica cambios estructurales a medida en que la proteína se convierte en unidades peptídicas más pequeñas (Kristinsson & Rasco, 2000), lo que, a su vez, aumenta el contenido de nitrógeno α -amino. Este cambio en el contenido de nitrógeno α -amino se produce porque la enzima muestra distintas especificidades para diferentes sustratos proteicos. Park *et al.* (2004) reportaron que la especificidad de la enzima por un sustrato se ve afectada, tanto por el tamaño molecular del polímero como a las diferentes actividades catalíticas de la enzima.

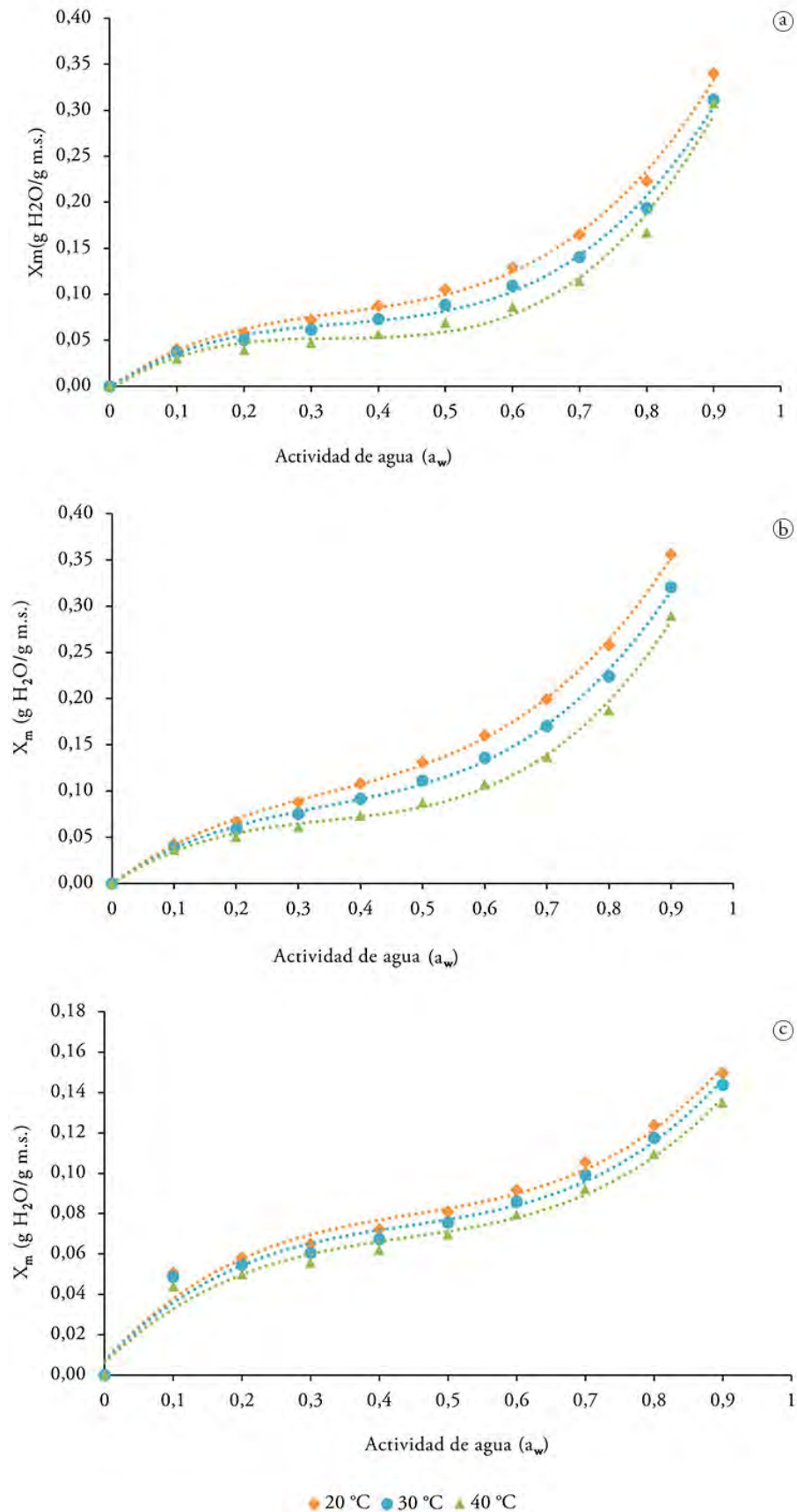


Figura 1. Humedad de equilibrio (X_m) de las isoterms de harina de tarwi en función de la temperatura y la actividad de agua (a_w). (a) Tipo 1: deslupinizada; (b) Tipo 2: desgrasada; (c) Tipo 3: hidrolizada.

En la tabla 2, se observa que del modelo GAB, en todos los tratamientos, se encontró valores de coeficiente de determinación (R^2) muy próximos a 1 y error medio relativo (EMR), inferior al 10 %, lo que sugiere que el modelo explica casi toda la variabilidad de los datos experimentales. Un EMR inferior al 10 % indica que el error entre lo predicho por el modelo y lo observado experimentalmente es relativamente bajo, lo que refuerza la calidad del ajuste.

Determinación de la humedad de monocapa. El contenido de humedad de la monocapa (X_0) representa la cantidad de agua

que se encuentra fuertemente absorbida en los sitios específicos de la superficie del alimento; es, por tanto, considerado un valor importante para garantizar la estabilidad de los alimentos durante el almacenamiento, especialmente, cuando va a ser a largo plazo. Por debajo de este valor, el agua adsorbida no puede ser utilizada como disolvente, por lo que se minimiza la velocidad de las reacciones de deterioro; esto incluye, la oxidación de lípidos y la actividad enzimática (Sánchez-Riaño *et al.* 2022).

Tabla 2. Variables del modelo GAB para las isotermas de los tres tipos de harina de tarwi.

Harina de tarwi	Variables ^a	Temperatura (°C)		
		20	30	40
Tipo 1	X_0	0,062 ± 0,001	0,050 ± 0,001	0,037 ± 0,002
	C_G	14,340 ± 2,081	20,292 ± 3,845	33,993 ± 26,054
	K_G	0,911 ± 0,008	0,936 ± 0,008	0,979 ± 0,008
	R^2	0,999 ± 0,001	0,998 ± 0,001	0,996 ± 0,001
	EMR (%)	5,452 ± 1,021	7,189 ± 0,443	8,869 ± 0,906
Tipo 2	X_0	0,087 ± 0,001	0,070 ± 0,001	0,050 ± 0,002
	C_G	8,764 ± 0,513	10,944 ± 0,877	19,617 ± 3,842
	K_G	0,847 ± 0,005	0,875 ± 0,004	0,919 ± 0,014
	R^2	0,999 ± 0,001	0,998 ± 0,001	0,996 ± 0,001
	EMR (%)	5,218 ± 0,609	5,555 ± 0,827	5,990 ± 1,780
Tipo 3	X_0	0,052 ± 0,001	0,048 ± 0,001	0,044 ± 0,001
	C_G	114,306 ± 23,612	231,364 ± 108,841	156,171 ± 49,642
	K_G	0,724 ± 0,008	0,741 ± 0,006	0,748 ± 0,005
	X_0	0,999 ± 0,001	0,998 ± 0,001	0,996 ± 0,001
	EMR (%)	4,837 ± 0,499	5,679 ± 0,657	4,976 ± 0,993

^a X_0 expresado como g H₂O/g de sólidos seco. Valores obtenidos de tres repeticiones.

En la tabla 2, se presentan las variables de la ecuación de GAB de las isotermas a los tres tipos de harina. Se determinó que el valor de monocapa fue 0,062, 0,05 y 0,037 g H₂O/g m.s., a 20, 30 y 40 °C, en el mismo orden para la harina tipo 1; en tanto que, para la harina tipo 2 fue 0,087, 0,07 y 0,05 g H₂O/g m.s., a 20, 30 y 40 °C, en el mismo orden y para la harina tipo 3, se tuvo 0,052, 0,048 y 0,044 g H₂O/g m.s., a 20, 30 y 40 °C, respectivamente. La cuantificación de monocapa en quinua se reporta 0,0867, 0,0851 y 0,0590 g H₂O/g m.s., a 20, 30 y 40 °C, correspondientemente (Tolaba *et al.* 2004) y en harina de kiwicha, una monocapa de 0,0837 g H₂O/g m.s., a 25 °C (Valdez-Niebla *et al.* 1993); esto sugiere que la harina de tarwi en sus condiciones deslupinizada e hidrolizada es menos higroscópica, característica importante para limitar el crecimiento microbiano. Este comportamiento de la harina deslupinizada se debería a la presencia de fracción lipídica que limita la adherencia del agua del ambiente; en tanto, para la harina hidrolizada, la generación de grupos terminales hidrofóbicos, producto de la acción enzimática. Se determinó, además, que los datos de X_0 para las diversas condiciones de harina difieren estadísticamente entre sí, en función a la temperatura (p-valor < 0.05).

Calor isostérico de sorción, superficie de adsorción, entropía de sorción y energía libre de Gibbs. En la tabla 3, se presentan los valores promedio del calor isostérico de sorción (Q_{st}), el área de adsorción (S), la entropía de sorción (ΔS) y la energía libre de Gibbs (ΔG), para los tres tipos de harina de tarwi evaluados.

Q_{st} es un indicador termodinámico usado para comprender la interacción entre la humedad y los materiales alimentarios, así como para analizar el proceso de secado y la estabilidad de los alimentos, en determinadas condiciones de almacenamiento (Arslan-Tontul, 2020). El calor isostérico neto de sorción se calculó mediante la ecuación de Clausius-Clapeyron en el intervalo de humedad de 0,05 a 0,25 g H₂O/g m.s. Puesto que los valores son positivos, la adsorción en las harinas de tarwi experimentan reacciones de tipo endotérmico. Se evidenció, además, que a contenidos de X_m mayores, los valores de Q_{st} disminuyeron; este efecto ya se había reportado en otros estudios, como los de Tunç & Duman (2007), Mallek-Ayadi *et al.* (2020), Arslan-Tontul (2021) y Sánchez-Torres *et al.* (2021). Esto se puede atribuir al hecho de que, para un bajo

contenido de humedad, existe muchos sitios polares activos en la superficie del material alimenticio que se unen a las moléculas de agua y forman una única capa molecular; por lo tanto, la energía necesaria para eliminar la fuerza del agua unida es relativamente alta. Por su parte, el hecho de tener Q_{st} menores a mayores X_m indica que la energía requerida para unir moléculas de agua es inferior a

la requerida para unir el agua a los componentes de la matriz; es la razón por la que el agua se encuentra en forma libre, cuanto mayor sea a_w . Los valores de Q_{st} para las harinas tipo 1, tipo 2 y tipo 3 fueron 39,306, 34,755 y 40,559 kJ/mol, respectivamente, a la temperatura de 20 °C, disminuyendo a 38,452, 33,901 y 39,704 kJ/mol, respectivamente, a la temperatura de 40 °C.

Tabla 3. Propiedades termodinámicas (Q_{st} , A_s , ΔS y ΔG) para los tres tipos de harina de tarwi.

Harina de tarwi	Temperatura (°C)	Q_{st} (kJ/mol) ^a	A_s (m ² /g m.s.)	ΔS (kJ/kmol·K)	ΔG (kJ/kmol)
Tipo 1	20	39,306 ± 0,184	219,245 ± 4,928	10,487 ± 0,735	0,506 ± 2,485
	30	38,876 ± 0,190	175,044 ± 4,086		0,424 ± 2,569
	40	38,452 ± 0,175	129,400 ± 5,405		0,343 ± 2,652
Tipo 2	20	34,755 ± 0,982	308,864 ± 4,155	24,853 ± 3,347	-4,840 ± 1,015
	30	34,325 ± 0,977	246,628 ± 3,625		-5,094 ± 1,049
	40	33,901 ± 0,954	177,985 ± 7,307		-5,347 ± 1,084
Tipo 3	20	40,559 ± 0,142	185,139 ± 2,008	10,487 ± 0,632	0,506 ± 2,485
	30	40,128 ± 0,121	169,446 ± 1,969		0,424 ± 2,569
	40	39,704 ± 0,137	156,207 ± 1,273		0,343 ± 2,652

^a Los valores de desviación estándar son los mismos en las tres temperaturas, debido a que la pendiente de la ecuación (4) es la misma. Valores obtenidos de tres repeticiones.

Al respecto, Zhu *et al.* (2021) reportaron que los componentes que conforman los alimentos tienen un impacto en el comportamiento de sorción de humedad. La energía de unión entre las moléculas de agua y el material alimentario disminuye al retirar el contenido graso de la harina (tipo 2). Además, el alto calor de sorción de la harina tipo 3 es un indicador de que se requiere una mayor energía para vaporizar el agua de la harina durante un proceso de secado.

El área de la superficie de adsorción (A_s) es un indicador para determinar la capacidad de los materiales alimentarios de absorber humedad, lo que puede afectar la textura, el sabor y la vida útil del producto. El área de superficie de adsorción de las harinas de tarwi se calculó empleando los valores de X_0 , a partir del modelo GAB. Los valores de A_s fueron 219,24, 175,04 y 129,40 m²/g m.s., para la harina tipo 1; 308,86, 246,62 y 177,98 m²/g m.s., para la harina tipo 2 y 185,13, 169,44 y 156,20 m²/g m.s., para la harina tipo 3, todas ellas a condiciones de 20, 30 y 40 °C, correspondientemente. Según indican estos resultados, el área superficial disminuye a medida en que se incrementa la temperatura, debido a que la disponibilidad de área para la unión hidrófila disminuye por la variación física y química, provocada por el intervalo térmico (Fan *et al.* 2015). La adsorción de humedad se ve influenciada por la interacción de la superficie, su estructura y la composición química del material alimenticio (Arslan-Tontul, 2020). Un estudio realizado por Kizzie *et al.* (2021), pone de manifiesto que la temperatura ejerce una influencia importante sobre el desarrollo microbiano y actividad enzimática, lo que desencadena reacciones de deterioro, modificando la composición química del alimento, durante su almacenamiento. Además, se observó que las harinas de tarwi lograron absorber una mayor cantidad de agua a 20 °C, comparada con 40 °C.

Respecto a la entropía de sorción (ΔS), Collazos *et al.* (2020) y Soares Silva *et al.* (2021) indican que está relacionada con el número de sitios de sorción disponibles en un nivel de energía específico y la disposición espacial entre la matriz de agua y alimentos, por lo tanto, es útil para caracterizar el grado de desorden en un sistema determinado. Se evidenció que al incrementar X_m hasta 0,10 g H₂O/g m.s., el valor de ΔS disminuye y luego se incrementa para $X_m > 0,1$. Tendencias similares fueron reportadas por Moreira *et al.* (2008), Collazos *et al.* (2020) y Sánchez-Torres *et al.* (2021).

Cuando la humedad toma valores bajos (< 0,10 g H₂O/g m.s.) existe una pérdida del movimiento rotacional de las moléculas de agua a medida que los sitios de sorción disponibles se van saturando; por lo tanto, los incrementos de la fracción acuosa conducen a un descenso de la entropía y al desorden en el sistema (Kurozawa *et al.* 2015); sin embargo, sucede que si $X_m > 0,10$ g H₂O/g m.s., se observa que la entropía se incrementaba ligeramente, lo cual, se pudo atribuir al incremento del contenido de humedad, que permitió que se adsorbieran más moléculas de agua en la multicapa y el agua con menor energía de enlace y, por tanto, con mayor movilidad para la rotación y traslación (Soares Silva *et al.* 2021). El valor promedio de la entropía de adsorción fue más bajo (8,42 kJ/kmol·K) en la harina de tarwi tipo 3, seguido del tipo 1 (10,487 kJ/kmol·K) y el tipo 2 (24,853 kJ/kmol·K). Esto indica que en la harina tipo 1, las moléculas de agua se encuentran más atrapadas e incapaces de favorecer las reacciones de deterioro de la harina.

La energía libre de Gibbs (ΔG) es un parámetro termodinámico, cuyo valor representa la cantidad máxima de energía que se libera durante un proceso, bajo temperatura y presión constantes (Soares Silva *et al.* 2021). Durante la adsorción, ΔG se puede emplear para

estimar la afinidad entre una matriz sólida y el agua; además, de determinar si la sorción de agua obedece a un proceso espontáneo o no. Por lo general, si ΔG es negativo (como el caso de las harinas tipo 2 y 3), el proceso se considera espontáneo; por el contrario, en la harina tipo 1, se considera que el proceso no es espontáneo (McMinn *et al.* 2007). ΔG , para la harina tipo 1, estuvo entre 0,506 – 0,343 kJ/kmol a 20 y 40 °C, respectivamente. Para las harinas tipo 2 y 3 estuvo entre -4,84 – -5,347 kJ/kmol y entre -1,37 – -1,657 kJ/kmol, a 20 y 40 °C.

Los valores negativos de ΔG en las harinas tipo 2 y 3 confirmaron que el proceso de adsorción de agua en las muestras de harina fue espontáneo, es decir, no fue necesario absorber energía del medio ambiente, para garantizar que se produzca la reacción. Resultados similares han sido reportados para granos de quinua (Arslan-Tontul, 2021) y café molido (de Oliveira *et al.* 2017). Por lo tanto, la harina tipo 1 requirió energía para la reacción, pues las moléculas de agua estaban más fuertemente confinadas a la matriz del alimento a niveles bajos de humedad (Collazos *et al.* 2020; López-Vidaña *et al.* 2021).

Como conclusión, se determinó la presencia de agua en el equilibrio para los tres tipos de harina de tarwi (Tipo 1: deslupinizada, Tipo 2: desgrasada y Tipo 3: hidrolizada), como dependencia de la a_w a 20, 30 y 40 °C. Se observó que la humedad de equilibrio incrementó su valor al elevar la actividad de agua y disminuyó, cuando a a_w constante se incrementó la temperatura. En todos los casos, las isothermas exhibieron un comportamiento de configuración II, según tipología de Brunauer, con una forma sigmoidal. El modelo GAB se ajustó adecuadamente a los datos experimentales (R^2 cercano a 1). El calor isostérico en el intervalo estudiado (0,5 – 0,25 g H₂O/g m.s.) fue mayor en la harina Tipo 3; además, en todos los casos fue positivo y disminuyó al incrementar la temperatura. El área de adsorción fue superior en la harina Tipo 2, puesto que está relacionada con la monocapa, disminuyendo con el incremento de temperatura. La entropía también fue mayor en la harina Tipo 2, donde la movilidad molecular del agua fue mayor. La energía libre de Gibbs fue positiva para la harina Tipo 1, disminuyendo al incrementar la temperatura; además, en las harinas tipo 2 y 3, el valor negativo de la energía libre de Gibbs indicó que el proceso fue espontáneo.

Agradecimientos. Los autores agradecen a la Cooperativa Agraria Ecológica Markahuamachuco, por proporcionarnos los granos de tarwi para esta investigación. **Conflicto de interés.** Los autores declaran que no existe ningún conflicto de intereses con relación a la publicación de este artículo. Parte de esta investigación es el resultado del trabajo de pregrado para optar el título profesional de Santos Martín Briceño Sevillano. **Financiación.** El trabajo se realizó con recursos de la Universidad Nacional de Trujillo-Escuela de Ingeniería Agroindustrial-Filial Huamachuco. **Contribución de autores.** Rodolfo Moisés Vegas Niño: conceptualización, metodología y redacción; Luberto Marceliano Sánchez: validación, análisis formal y supervisión; Santos Martín Briceño Sevillano: Recursos, investigación y curación de datos.

REFERENCIAS

- ABATI, J.; ZUCARELLI, C.; BRZEZINSKI, C.; LOPES, I.; KRZYZANOWSKI, F.; MORAES, L.; HENNING, F. 2021. Water absorption and storage tolerance of soybean seeds with contrasting seed coat characteristics. *Acta Scientiarum Agronomy*. 44(1):e53096. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v44i1.53096>
- ALAMRI, M.; MOHAMED, A.; HUSSAIN, S.; IBRAHEEM, M.; ABDO QASEM, A. 2018. Determination of moisture sorption isotherm of crosslinked millet flour and oxirane using GAB and BET. *Journal of Chemistry*. 2018:2369762. <https://doi.org/10.1155/2018/2369762>
- ARSLAN-TONTUL, S. 2020. Moisture sorption isotherm, isosteric heat and adsorption surface area of whole chia seeds. *Food Science and Technology*. 119:108859. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108859>
- ARSLAN-TONTUL, S. 2021. Moisture sorption isotherm and thermodynamic analysis of quinoa grains. *Heat and Mass Transfer*. 57(3):543-550. <https://doi.org/10.1007/s00231-020-02978-8>
- AYALA APONTE, A.A. 2016. Propiedades termodinámicas de humedad de sorción en harina de yuca. *DYNA*. 83(197):138-144. <https://doi.org/10.15446/dyna.v83n197.51543>
- AZHAR, M.; ABD HASHIB, S.; IBRAHIM, U.; MD ZAKI, N.; AHMAD ZAMANHURI, N.; ABD RAHMAN, N. 2021. Moisture sorption isotherm and thermodynamic properties of L. (CAL) powder. *Chemical Engineering Communications*. 208(4):573-582. <https://doi.org/10.1080/00986445.2020.1780213>
- BERRU, L.; GLORIO-PAULET, P.; BASSO, C.; SCARAFONI, A.; CAMARENA, F.; HIDALGO, A.; BRANDOLINI, A. 2021. Chemical composition, tocopherol and carotenoid content of seeds from different Andean Lupin (*Lupinus mutabilis*) ecotypes. *Plant Foods for Human Nutrition*. 76(1):98-104. <https://doi.org/10.1007/s11130-021-00880-0>
- BHANDARI, B.; ADHIKARI, B. 2008. Water activity in food processing and preservation. En: Chen, X.D.; Mumumdar, A.S. (Eds.), *Drying technologies in food processing*. Blackwell Publishing. p.55-89.
- BRUNAUER, S.; DEMING, L.; DEMING, W.; TELLER, E. 1940. On a theory of the van der Waals adsorption of gases. *Journal of the American Chemical Society*. 62(7):1723-1732. <https://doi.org/10.1021/ja01864a025>
- CARVAJAL-LARENAS, F.; LINNEMANN, A.; NOUT, M.; KOZIOL, M.; VAN BOEKEL, M. 2016. *Lupinus mutabilis*: Composition, uses, toxicology, and debittering. *Critical*

- Reviews in Food Science and Nutrition. 56(9):1454-1487. <https://doi.org/10.1080/10408398.2013.772089>
- CHALAMPUENTE-FLORES, D.; MOSQUERA-LOSADA, M.; DE RON, A.; TAPIA BASTIDAS, C.; SØRENSEN, M. 2023. Morphological and ecogeographical diversity of the Andean Lupine (*Lupinus mutabilis* Sweet) in the high andean region of Ecuador. *Agronomy*. 13(8):2064. <https://doi.org/10.3390/agronomy13082064>
- CHEN, J.; KHAJE, M.; MEHDI, M.; ALTALBAWY, F.; TURKI, A.; ALI EFTEKHARI, S.; HASHEMIAN, M.; TOGHRAIE, D.; FADEL, Z. 2023. Transverse vibration analysis of double-walled carbon nanotubes in an elastic medium under temperature gradients and electrical fields based on nonlocal Reddy beam theory. *Materials Science and Engineering. B*. 291:116220. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2022.116220>
- CHENG, X.; LING, P.; IQBAL, M.; LIU, F.; XU, J.; WANG, X. 2023. Water adsorption properties of microalgae powders: Thermodynamic analysis and structural characteristics. *Journal of Stored Products Research*. 101:102093. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2023.102093>
- COLLAZOS ESCOBAR, G.A.; GUTIERREZ GUZMAN, N.; VAQUIRO HERRERA, H.A.; AMOROCHO CRUZ, C. 2020. Moisture dynamic sorption isotherms and thermodynamic properties of parchment specialty coffee (*Coffea arabica* L.). *Coffee Science*. 15:e151684. <https://doi.org/10.25186/v15i.1684>
- CÓRDOVA-RAMOS, J.; GLORIO-PAULET, P.; CAMARENA, F.; BRANDOLINI, A.; HIDALGO, A. 2020. Andean lupin (*Lupinus mutabilis* Sweet): Processing effects on chemical composition, heat damage, and in vitro protein digestibility. *Cereal Chemistry*. 97(4):827-835. <https://doi.org/10.1002/cche.10303>
- CZUBINSKI, J.; GRYGIER, A.; SIGER, A. 2021. *Lupinus mutabilis* seed composition and its comparison with other lupin species. *Journal of Food Composition and Analysis*. 99:103875. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2021.103875>
- DE OLIVEIRA, G.; CORRÊA, P.; OLIVEIRA, A.; BAPTESTINI, F.; VARGAS, G. 2017. Roasting, grinding, and storage impact on thermodynamic properties and adsorption isotherms of Arabica Coffee. *Journal of Food Processing and Preservation*. 41(2):e12779. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12779>
- DUSHKOVA, M.; DIMOV, M.; LAZAROV, L.; PENCHEVA, M.; KOSTOVA, I.; DAMYANOVA, S.; MENKOV, N.; STOYANOVA, A.; ERCISLI, S.; ASSOUGUEM, A.; ALINA, R.; AYVAZ, D.; ULLAH, R.; BARI, A. 2023. Physical, chemical, sorption and microbiological characteristics of fennel fruits. *Heliyon*. 9(9):e19127. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19127>
- ESFE, M.; ESMAILY, R.; KHABAZ, M.; ALIZADEH, A.; PIRMORADIAN, M.; RAHMANIAN, A.; TOGHRAIE, D. 2023. A novel integrated model to improve the dynamic viscosity of MWCNT-Al₂O₃ (40:60)/Oil 5W50 hybrid nano-lubricant using artificial neural networks (ANNs). *Tribology International*. 178:108086. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2022.108086>
- FAKHFAKH, R.; MIHOUBI, D.; KECHAOU, N. 2018. Moisture sorption isotherms and thermodynamic properties of bovine leather. *Heat and Mass Transfer*. 54(4):1163-1176. <https://doi.org/10.1007/s00231-017-2223-0>
- FAN, K.; CHEN, L.; WEI, X.; HE, J.; YAN, F. 2015. Moisture adsorption isotherms and thermodynamic properties of *Auricularia auricula*. *Journal of Food Processing and Preservation*. 39(6):1534-1541. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12379>
- GARCÍA, J.; CÁRCEL, J.; CLEMENTE, G.; MULET, A. 2008. Water sorption isotherms for lemon peel at different temperatures and isosteric heats. *Food Science and Technology*. 41(1):18-25. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2007.02.010>
- GROSS, R.; VON BAER, E.; KOCH, F.; MARQUARD, R.; TRUGO, L.; WINK, M. 1988. Chemical composition of a new variety of the Andean lupin (*Lupinus mutabilis* cv. Inti) with low-alkaloid content. *Journal of Food Composition and Analysis*. 1(4):353-361. [https://doi.org/10.1016/0889-1575\(88\)90035-X](https://doi.org/10.1016/0889-1575(88)90035-X)
- GULISANO, A.; ALVES, S.; MARTINS, J.; TRINDADE, L. 2019. Genetics and breeding of *Lupinus mutabilis*: An emerging protein crop. *Frontiers in Plant Science*. 10:1385. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01385>
- JO, K.; HONG, K.; SUH, H. 2020. Effects of the whey protein hydrolysates of various protein enzymes on the proliferation and differentiation of 3T3-E1 osteoblasts. *Preventive Nutrition and Food Science*. 25(1):71-77. <https://doi.org/10.3746/pnf.2020.25.1.71>
- KAROUI, I.; TERRAS, D.; YEDDES, W.; HAMMAMI, M.; ABDERRABBA, M. 2023. Formulation of pasta enriched with protein-rich lupine (*Lupinus mutabilis* Sweet) and wheat bran using mixture design approach. *Journal of Food Science*. 88(10):4001-4014. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16736>
- KIZZIE, N.; DABIE, K.; KYEI, B.; AMPOFO, J.; ZAHN, S.; JAROS, D.; ROHM, H. 2021. Storage temperature of tiger nuts (*Cyperus esculentus* L) affects enzyme

- activity, proximate composition and properties of lactic acid fermented tiger nut milk derived thereof. *Food Science and Technology*. 137:110417. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110417>
- KOÇ, A.; ERBAŞ, M. 2022. Investigation of sorption isotherms of wheat germ for its effect on lipid oxidation. *Journal of Food Science*. 87(5):2072-2082. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16133>
- KOUA, B.; KOFFI, P.; GBAHA, P.; TOURE, S. 2014. Thermodynamic analysis of sorption isotherms of cassava (*Manihot esculenta*). *Journal of Food Science and Technology*. 51(9):1711-1723. <https://doi.org/10.1007/s13197-012-0687-y>
- KRISTINSSON, H.; RASCO, B. 2000. Fish protein hydrolysates: Production, biochemical, and functional properties. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 40(1):43-81. <https://doi.org/10.1080/10408690091189266>
- KUROZAWA, L.; DE OLIVEIRA, R.; HUBINGER, M.; PARK, K. 2015. Thermodynamic properties of water desorption of papaya. *Journal of Food Processing and Preservation*. 39(6):2412-2420. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12491>
- LANCELOT, E.; FONTAINE, J.; GRUA, J.; LE-BAIL, A. 2021. Effect of long-term storage conditions on wheat flour and bread baking properties. *Food Chemistry*. 346:128902. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128902>
- LEWICKI, P.P. 1997. The applicability of the GAB model to food water sorption isotherms. *International Journal of Food Science & Technology*. 32(6):553-557. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1997.tb02131.x>
- LI, X.; HAN, X.; TAO, L.; JIANG, P.; QIN, W. 2021. Sorption equilibrium moisture and isosteric heat of Chinese wheat bran products added to rice to increase its dietary fibre content. *Grain & Oil Science and Technology*. 4(4):149-164. <https://doi.org/10.1016/j.gaost.2021.09.001>
- LÓPEZ-VIDAÑA, E.; CASTILLO TÉLLEZ, M.; PILATOWSKY FIGUEROA, I.; SANTIS ESPINOSA, L.; CASTILLO-TÉLLEZ, B. 2021. Moisture sorption isotherms, isosteric heat, and Gibbs free energy of stevia leaves. *Journal of Food Processing and Preservation*. 45(1):e15016. <https://doi.org/10.1111/jfpp.15016>
- MAFTOON AZAD, N.; ALIZADEH, A.; KAZEMIYAN JAHROMI, A.; EHSAN TORKAMANI, A.; BAGHAEI, S.; MIRAZIMI ABARGHUEI, F. 2023. Effects of thermodynamic properties of rice and ambient conditions on moisture migration during storage at naturally ventilated warehouses. *Arabian Journal of Chemistry*. 16(7):104761. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2023.104761>
- MALLEK-AYADI, S.; BAHLOUL, N.; KECHAOU, N. 2020. Mathematical modelling of water sorption isotherms and thermodynamic properties of *Cucumis melo* L. seeds. *Food Science and Technology*. 131:109727. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109727>
- MARTÍN-SANTOS, J.; VIOQUE, M.; GÓMEZ, R. 2012. Thermodynamic properties of moisture adsorption of whole wheat flour. Calculation of net isosteric heat. *International Journal of Food Science & Technology*. 47(7):1487-1495. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2012.02996.x>
- MCMINN, W.; AL-MUHTASEB, A.; MAGEE, T. 2005. Enthalpy-entropy compensation in sorption phenomena of starch materials. *Food Research International*. 38(5):505-510. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2004.11.004>
- MCMINN, W.; MAGEE, T. 2003. Thermodynamic properties of moisture sorption of potato. *Journal of Food Engineering*. 60(2):157-165. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(03\)00036-0](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00036-0)
- MCMINN, W.; MCKEE, D.; MAGEE, T. 2007. Moisture adsorption behaviour of oatmeal biscuit and oat flakes. *Journal of Food Engineering*. 79(2):481-493. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.02.009>
- MINISTERIO DE DESARROLLO AGRARIO Y RIEGO. 2023. Producción de tarwi de Perú alcanzó las 16.000 toneladas en 2023. Disponible desde Internet en: <https://agraria.pe/noticias/produccion-de-tarwi-de-peru-alcanzo-las-16-000-toneladas-en--36884>
- MOREIRA, R.; CHENLO, F.; TORRES, M.; VALLEJO, N. 2008. Thermodynamic analysis of experimental sorption isotherms of loquat and quince fruits. *Journal of Food Engineering*. 88(4):514-521. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.03.011>
- NOVOA, F. 2019. Simulation of the temperature of barley during its storage in cylindrical silos. *Mathematics and Computers in Simulation*. 157:1-14. <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2018.09.004>
- OUAABOU, R.; ENNAHLI, S.; DI LORENZO, C.; HANINE, H.; BAJOUB, A.; LAHLALI, R.; IDLIMAM, A.; AIT OUBAHOU, A.; MESNAOUI, M. 2021. Hygroscopic properties of sweet cherry powder: Thermodynamic properties and microstructural changes. *Journal of Food Quality*. 2021(1):3925572. <https://doi.org/10.1155/2021/3925572>
- PANIGRAHI, S.; FIELKE, J.; SINGH, C. 2022. Evaluating isotherms and isosteric heat utilization during sorption characteristics of feed barley. *Journal of Stored Products Research*. 96:101955. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2022.101955>

- PARK, P.; JUNG, W.; KIM, S.; JUN, S. 2004. Purification and characterization of an antioxidative peptide from enzymatic hydrolysate of yellowfin sole (*Limanda aspera*) frame protein. *European Food Research and Technology*. 219(1):20-26. <https://doi.org/10.1007/s00217-004-0882-9>
- PENTEADO ROSA, D.; RODRIGUES EVANGELISTA, R.; BORGES MACHADO, A.; RIBEIRO SANCHES, M.; TELIS-ROMERO, J. 2021. Water sorption properties of papaya seeds (*Carica papaya* L.) formosa variety: An assessment under storage and drying conditions. *Food Science and Technology*. 138:110458. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110458>
- ROSA, G.; MORAES, M.; PINTO, L. 2010. Moisture sorption properties of chitosan. *Food Science and Technology*. 43(3):415-420. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2009.09.003>
- SÁNCHEZ-RIANO, A.; SOLANILLA-DUQUE, J.; VÁQUIRO-HERERA, H. 2022. Desorption and thermophysical properties of feijoa pulp as affected by temperature and moisture content. *International Journal of Food Properties*. 25(1):2089-2106. <https://doi.org/10.1080/10942912.2022.2125008>
- SÁNCHEZ-TORRES, E.; ABRIL, B.; BENEDITO, J.; BON, J.; GARCÍA-PÉREZ, J. 2021. Water desorption isotherms of pork liver and thermodynamic properties. *Food Science and Technology*. 149:111857. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111857>
- SAWHNEY, I.; SARKAR, B.; PATIL, G. 2011. Moisture sorption characteristics of dried acid casein from buffalo skim milk. *Food Science and Technology*. 44(2):502-510. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2010.07.009>
- SIMIONIUC, D.; SIMIONIUC, V.; TOPA, D.; VAN DEN BERG, M.; PRINS, U.; BEBELI, P. J.; GABUR, I. 2021. Assessment of andean lupin (*Lupinus mutabilis*) genotypes for improved frost tolerance. *Agriculture*. 11(2):155. <https://doi.org/10.3390/agriculture11020155>
- SOARES SILVA, K.; POLACHINI, T.; LUNA-FLORES, M.; LUNA-SOLANO, G.; RESENDE, O.; TELIS-ROMERO, J. 2021. Sorption isotherms and thermodynamic properties of wheat malt under storage conditions. *Journal of Food Process Engineering*. 44(9). <https://doi.org/10.1111/jfpe.13784>
- TOĞRUL, H.; ARSLAN, N. 2007. Moisture sorption isotherms and thermodynamic properties of walnut kernels. *Journal of Stored Products Research*. 43(3):252-264. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2006.06.006>
- TOLABA, M.; PELTZER, M.; ENRIQUEZ, N.; LUCÍA POLLIO, M. 2004. Grain sorption equilibria of quinoa grains. *Journal of Food Engineering*. 61(3):365-371. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(03\)00143-2](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00143-2)
- TUNÇ, S.; DUMAN, O. 2007. Thermodynamic properties and moisture adsorption isotherms of cottonseed protein isolate and different forms of cottonseed samples. *Journal of Food Engineering*. 81(1):133-143. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.10.015>
- VALDEZ-NIEBLA, J.; PAREDES-LÓPEZ, O.; VARGAS-LÓPEZ, J.M.; HERNÁNDEZ-LÓPEZ, D. 1993. Moisture sorption isotherms and other physicochemical properties of nixtamalized amaranth flour. *Food Chemistry*. 46(1):19-23. [https://doi.org/10.1016/0308-8146\(93\)90069-R](https://doi.org/10.1016/0308-8146(93)90069-R)
- WAN, J.; DING, Y.; ZHOU, G.; LUO, S.; LIU, C.; LIU, F. 2018. Sorption isotherm and state diagram for indica rice starch with and without soluble dietary fiber. *Journal of Cereal Science*. 80:44-49. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2018.01.003>
- ZHU, G.; JIN, Q.; LIU, Y.; LIN, Y.; WANG, J.; LI, X. 2021. Moisture sorption and thermodynamic properties of *Camellia oleifera* seeds as influenced by oil content. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 14(1):251-258. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20211401.5457>

Caracterización y percepción de los servicios ecosistémicos de un parque ecoturístico en un ejido del Estado de México, México

Characterization and perception of ecosystem services of an ecotourism park in an ejido in the State of Mexico, Mexico

Sofia Ochoa-López^{1*} ; Javier Gúzman-Sánchez² ; Carlos Peralta-Olmedo¹ 

¹Instituto Tecnológico de Gustavo A. Madero. Ciudad de México, México; e-mail: sofia.os@gamadero.tecnm.mx, carlos.po@gamadero.tecnm.mx

²Universidad Nacional Autónoma de México, Escuela Nacional de Lenguas, Lingüística y Traducción. Ciudad de México, México; e-mail: javier.guzman@enallt.unam.mx

*autor de correspondencia: sofia.os@gamadero.tecnm.mx

Cómo citar: Ochoa-López, S.; Gúzman-Sánchez, J.; Peralta-Olmedo, C. 2025. Caracterización y percepción de los servicios ecosistémicos de un parque ecoturístico en un ejido del Estado de México, México. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 28(1):e2633. <http://doi.org/10.31910/rudca.v28.n1.2025.2633>

Artículo de acceso abierto publicado por Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, bajo una Licencia Creative Commons CC BY-NC 4.0

Publicación oficial de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Institución de Educación Superior Acreditada en Alta Calidad por el Ministerio de Educación Nacional

Recibido: marzo 31 de 2024

Aceptado: enero 15 de 2025

Editado por: Sandra Quijas

RESUMEN

El concepto de servicios ecosistémicos refleja las distintas formas en que la sociedad interactúa con la naturaleza, los cuales suelen clasificarse según una percepción utilitarista; sin embargo, existen categorías que se basan en las funciones y estructuras ecológicas para resaltar la importancia de los componentes de la naturaleza y formas de relacionarse con ellas. Un acercamiento al estudio de los servicios ecosistémicos es en los ecosistemas urbanos. La mancha urbana de la Ciudad de México crece de manera acelerada, poniendo en riesgo la diversidad de áreas naturales protegidas establecidas en su periferia. Aunque la mayoría de estas áreas las manejan instituciones gubernamentales, resaltan las zonas de tenencia social destinadas a la conservación. El ejido Emiliano Zapata destinó el 90 % de su territorio al manejo forestal sustentable con el Parque Ecoturístico Bosque Esmeralda, en la zona de influencia de uno de los parques nacionales y en la que la producción agrícola y ganadera intensivas han tenido un impacto ambiental significativo. Se analizaron los cambios en la cobertura forestal, como reflejo del proceso de reconversión en el territorio, así como la percepción social de los actores involucrados. Se encontró que existen formas de valoración de servicios ecosistémicos adicionales a la utilidad de los recursos naturales. Este enfoque es importante en el marco del cambio climático y considerando la acelerada urbanización, comprender el funcionamiento de los ecosistemas y la relación con los beneficios que proveen es crucial para la planeación territorial.

Palabras clave: Áreas protegidas voluntariamente; Áreas periurbanas; Socioecosistemas; Conservación comunitaria; Cobertura forestal.

ABSTRACT

Ecosystem services are a concept that reflects the different ways in which society interacts with nature, which are often classified with a utilitarian approach. However, there are alternative classifications based on ecological function and structure to highlight certain natural elements or interactions' relevance that differ from natural resources or tangible benefits. One way to understand ecosystem services is to assess them in urban areas as ecosystems. The urban sprawl of Mexico City is growing quickly, putting at risk the diversity of protected natural areas established on its periphery. Although most of these areas are managed by government institutions, certain social property zones are voluntarily established for conservation. The ejido Emiliano Zapata has put more than 90% of its territory into forestry programs as an ecotourist park Bosque Esmeralda, in an area influenced by one of the most traditional national parks in Central Mexico, in which intensive agriculture and husbandry have had a significant environmental impact. In this study, forest cover changes were analyzed as a reflection of the reconversion process in the territory, as well as social perception from both ejido inhabitants and ecotourist park workers and visitors, to assess ecosystem services in addition to natural resource management. It was found that there are ways of valuing additional ecosystem services in addition to the usefulness of natural resources. This approach is important in the context of climate change, and considering accelerated urbanization, understanding the functioning of ecosystems and their relationship to the benefits they provide is crucial for territorial planning.

Keywords: Communitarian conservation; Forest cover; Peri-urban areas; Socioecosystems; Voluntary protected areas.

INTRODUCCIÓN

El concepto de servicios ecosistémicos (SSEE) incorpora la amplia diversidad de beneficios, tangibles e intangibles, que recibe la sociedad, a través de distintas interacciones con la naturaleza (Costanza *et al.* 1997; Balvanera & Cotler, 2009; Perevochtchikova *et al.* 2019). Su impacto es significativo y sostenido desde la década de 1990, tanto en reflexiones académicas como en instrumentos de política pública, como The Millennium Ecosystem Assessment, MEA (2005), que agrupa a los SSEE en cuatro categorías: regulación, soporte, provisión y cultural que, a su vez, sirvió como base para el desarrollo de la Plataforma Intergubernamental Científico-Normativa sobre Diversidad Biológica y Servicios de los Ecosistemas (IPBES), que los incluye en el amplio concepto de Contribuciones de la Naturaleza a las Personas (CNP) (Almeida-Leñero *et al.* 2007; Díaz *et al.* 2015 ; Perevochtchikova *et al.* 2019; IPBES, 2019).

Precisamente, el enfoque de CNP permite explorar las interacciones con mayor influencia social que, en su caso, se englobaban como SSEE culturales. Se reconocen 18, los cuales, se agrupan en tres categorías, según su aporte a la calidad de vida de las personas: reguladoras, materiales y no materiales, estos últimos reconocidos, principalmente, como elementos culturales (Díaz *et al.* 2018). Parte del impacto funcional de los SSEE, como concepto, les permitió ingresar en esquemas económicos e instrumentos de política pública; el enfoque de CNP de la IPBES le reconoce dicha ventaja, como parte de un sistema epistémico mayor, que atiende las interacciones socio-ecológicas de forma integral, más allá de la funcionalidad ecosistémica (Díaz *et al.* 2015; 2018; IPBES 2019); no obstante, se mantiene la fortaleza del concepto de SSEE con amplia aceptación, tanto en ámbitos académicos como políticos o de la sociedad civil (Perevochtchikova *et al.* 2019).

La producción científica con respecto a SSEE ha incrementado, desde la década de 1990, tanto a nivel mundial (Cornejo-Latorre *et al.* 2014) como en Latinoamérica (Perevochtchikova *et al.* 2019); sin embargo, las aproximaciones se mantienen, principalmente, enfocadas de manera separada hacia los componentes sociales o los ecosistémicos de las relaciones socio-ecológicas, aunque reflexiones, como las de Folke (2006) y Martín-López *et al.* (2007), apuntan a la necesidad de construir modelos conceptuales integradores. De hecho, en Latinoamérica la discusión sobre SSEE culturales, que incluyen percepción social, solo representaron el 17,5 % de las investigaciones de 1992 a 2017, aunque mantuvieron una tendencia positiva, desde representar el 1 %, en 2006; mientras que estudios explícitamente transversales, representaron el 5 % de la producción científica (Perevochtchikova *et al.* 2019).

La oportunidad de transitar a enfoques, como el de IPBES y la tendencia en incremento, a nivel mundial y latinoamericano, sugieren la pertinencia de vincular elementos ecosistémicos y sociales en valorizaciones integrales, en aras de comprender mejor las relaciones socio-ecológicas, sea como SSEE o de manera más amplia, como CNP. En México, esta comprensión es de particular interés, debido a la biodiversidad que alberga, al creciente

número de especies que se encuentran en alguna categoría de riesgo (Rodríguez *et al.* 2019), a la íntima relación que guarda su conservación con el bienestar social (Cornejo-Latorre *et al.* 2014) y al constante crecimiento de ciudades, como su capital, la Ciudad de México (CDMX), que se cuenta como una de las mayores urbes de la región (Montoya-Rodríguez & Alonso-Navarrete, 2024).

Los efectos del crecimiento urbano se identifican con mayor frecuencia en su periferia, cuyos contextos híbridos, dinámicos y heterogéneos implican efectos en el entorno, como el uso de suelo y degradación, así como en su entramado social (Bonilla-Bedoya *et al.* 2020; Rodríguez *et al.* 2021; Díaz-Pinzón *et al.* 2022). Ahí, se pueden encontrar áreas que permiten estrategias de desarrollo local sin cambio de uso de suelo, de manera que, al tiempo que se conservan SSEE y otras CNP, se establecen alternativas, con el objetivo de contener el avance de la mancha urbana (Bonfil Jiménez & Ribeiro Palacios, 2022). Es crucial comprender esas interacciones en un contexto de crecimiento constante y acelerado, como el de la CDMX (Pérez-Herrera *et al.* 2018; Montoya-Rodríguez & Alonso-Navarrete, 2024).

Ahora bien, la periferia de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), derivada de la expansión de la CDMX, incluye ecosistemas forestales en Áreas Naturales Protegidas (ANP), que han conseguido contener su crecimiento, aunque suman apenas 60.965,5 hectáreas, menos del 8 % de la superficie metropolitana (Hernández-García & Granados-Sánchez, 2006; Acosta Mireles *et al.* 2014). Estos ecosistemas resultan especialmente relevantes por su extensión y la amplia variedad de SSEE que proveen, como la captura y el almacenamiento de carbono, la conservación de una amplia biodiversidad (10,000 especies vegetales a nivel nacional) y la belleza escénica, entre otros elementos culturales (Monárrez-González *et al.* 2018; Martínez-Trinidad *et al.* 2021). Entre las ANP distribuidas alrededor de la CDMX destacan las áreas destinadas voluntariamente a la conservación, por ser novedosas e incluyentes, en tanto, se fundamentan en la intención social de conservar el territorio, como complemento de los esfuerzos gubernamentales (Urquiza García, 2019).

Un complemento crucial de las ANP es el involucramiento social en su manejo, a través de mecanismos de sensibilización, consulta y participación de las comunidades que habitan en torno o, incluso, dentro de las áreas, principalmente, por el hecho de que más del 60 % del territorio protegido es de propiedad social, a través de ejidos y comunidades agrarias (Merino Pérez, 2014; Lagunas-Vázquez *et al.* 2016). Así, incorporar la apreciación social de los SSEE es fundamental para su conservación, como indicador del involucramiento y medio de monitoreo de su calidad (Lazos & Paré, 2000; Quétier *et al.* 2007; Castillo *et al.* 2009; Merino Pérez, 2014). Por su parte, la información espacial permite identificar tamaño y localización de las ANP, para la planificación territorial y la construcción de resiliencia y adaptación en torno a las urbes (Calderón Contreras, 2016). Una aproximación sistémica, epistemológicamente sólida y basada en la estrecha relación entre los componentes humano-naturaleza es la de Sistemas Socio-Ecológicos o Socioecosistemas (Maass, 2007).

En este sentido, el presente estudio propone abordar, con un enfoque integral, las condiciones biofísicas vinculadas con los SSEE, vinculados con cobertura forestal y elementos culturales, como la percepción social, considerando que en su convergencia se fundamenta, en buena medida, la relevancia de estos espacios, como alternativas de desarrollo local, que incluyen formas de resistencia y resiliencia ante el crecimiento urbano. Así, como objetivo se plantea la caracterización como socioecosistema del ANP Bosque Esmeralda, Área Destinada Voluntariamente a la Conservación en el ejido Emiliano Zapata, localizado en la periferia de la ZMVM y el análisis de los SSEE reflejados en su cobertura forestal, así como elementos culturales vinculados con la percepción social de actores involucrados, tanto colaboradores del parque ecoturístico como visitantes.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio de estudio. Los bosques en los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl constituyen una de las reservas forestales de mayor trascendencia, en una zona donde confluyen urbanizaciones de los estados de México, Morelos y Puebla, con el crecimiento de la propia ZMVM (Hernández-García & Granados-Sánchez, 2006; Acosta Mireles *et al.* 2014). En sus laderas occidentales, se encuentra el ejido Emiliano Zapata, dentro del municipio de Amecameca de Juárez. Este ejido cuenta con una extensión de 96,7 ha, de las cuales, más del 90 % se han destinado voluntariamente a la conservación, a través del Parque Ecoturístico Bosque Esmeralda (PEBE), para el impulsar el desarrollo del núcleo agrario, a través de la provisión de SSEE forestales: captura de carbono, por medio del manejo de bosque natural y de plantaciones forestales comerciales y actividades de ecoturismo (García Rodea *et al.* 2023) (Figura 1).

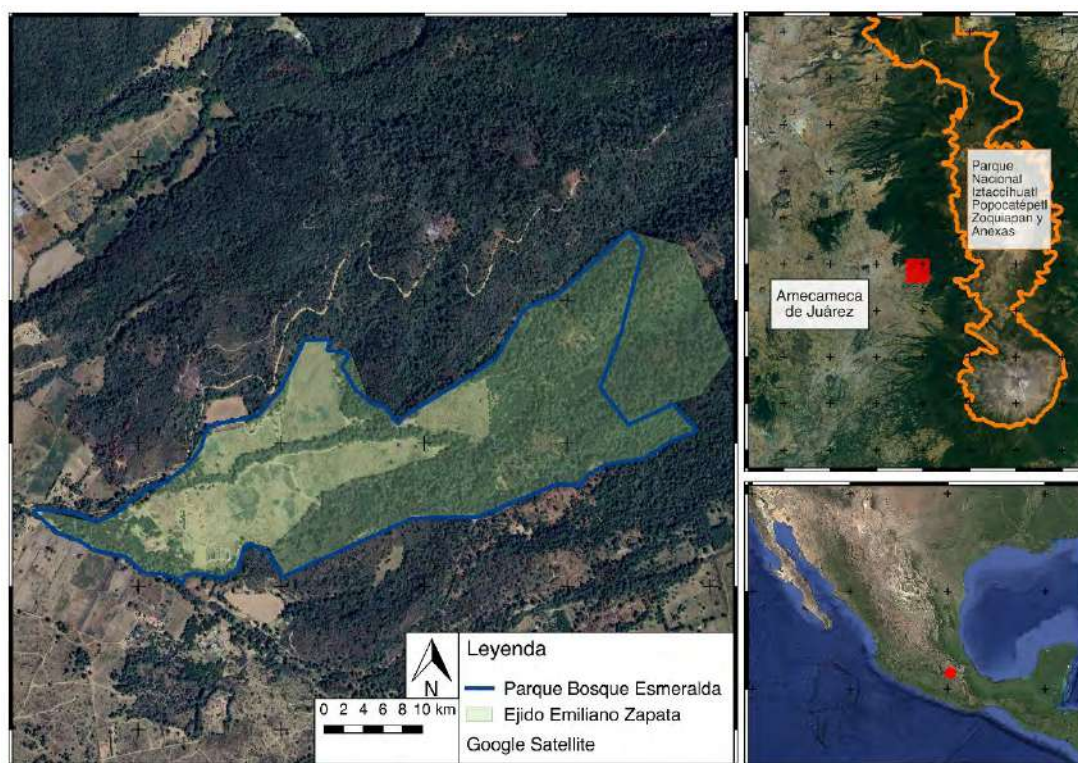


Figura 1. Mapa de ubicación del sitio de estudio con vista satelital de cobertura forestal en 2024. a) Se señala en azul, el límite del territorio del Parque Bosque Esmeralda; b) Cuadro rojo indica la ubicación del Parque con relación al municipio de Amecameca de Juárez y se resalta en anaranjado, el límite del Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl Zoquiapan y Anexas; c) Se resalta con punto rojo la ubicación del área de estudio en el contexto del territorio mexicano.

Debido a su cercanía con el Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl y Anexas, el PEBE comparte condiciones ambientales de la Sierra Nevada en la sección centro-oriental de la Faja Volcánica Transmexicana; bosque templado de coníferas y latifoliadas, una variedad de climas, desde el templado húmedo al frío y muy frío, a medida que incrementa su altura, temperatura media entre 12 y 18 °C (CONANP, 2013; Acosta Mireles *et al.* 2014). La zona está catalogada como Región Prioritaria para la Conservación en México e incluye 808 comunidades con, aproximadamente, un millón y medio de habitantes (CONANP, 2013). Fuera del Parque Nacional, el aprovechamiento forestal maderable es la

actividad forestal de mayor importancia económica; otras actividades, incluyen la agricultura de temporal, la ganadería y el turismo rural (Hernández-García & Granados-Sánchez, 2006; CONANP & GIZ, 2017).

Percepción social. Se identificaron como actores clave a los colaboradores del PEBE y a los visitantes. Para identificar el conocimiento y la percepción respecto a los SSEE y el estado de conservación en el parque, se realizaron 97 encuestas (55 colaboradores y 42 visitantes), de 40 preguntas, en el periodo de julio a diciembre de 2022. Con estas preguntas se procuró

cubrir aspectos como: frecuencia de visita, gastos generados por la visita, estado de conservación, actividades desempeñadas, problemáticas ambientales, conocimiento de los SSEE, amenazas y bienestar humano. Se midieron variables de tipo cualitativo, cuya frecuencia por tipo de actor fue analizada con el método de χ^2 de Pearson, en el software estadístico R 4.2.2. (R Core Team, 2023).

Cobertura forestal. Para evaluar el cambio de cobertura forestal, se utilizó el método de Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés) que, a través de la firma espectral de la vegetación, entre la banda visible e infrarrojo cercano, permite estudiar cambios ecológicos mediante imágenes satelitales, determinar el tipo de cobertura, evaluar su variación temporal o establecer el estado de salud vegetal (Alcaraz-Segura *et al.* 2008; Meneses-Tovar, 2012; Campaña-Olaya & Tafur, 2021). Se utilizaron imágenes LANDSAT, que contienen bandas espectrales con proyección cartográfica Universal Transversal de Mercator (WGS 84), obtenidas del portal United States Geological Survey (USGS) Earth Explorer (<https://earthexplorer.usgs.gov>), en una secuencia de cada 5 años, durante el periodo de 1980 al 2020 (1980, 1985, 1991, 1995, 2000, 2005, 2010, 2015 y 2020), en sintonía con la periodicidad cubierta por el Inventario Nacional Forestal y de Suelos (SEMARNAT, 2004) y acotadas a marzo, mayo, agosto, septiembre, octubre y noviembre, para minimizar cambios derivados de las temporadas de secas y lluvias. Se analizaron, específicamente, las bandas 5 y 6 de las imágenes Landsat 1-5 MSS C1 Level-1 y las bandas 3 y 4, tanto para imágenes Landsat 4-5 TM C1 Level-1 como para las imágenes Landsat 7 ETM+ C1 Level-1, con el complemento Semi-Automatic Classification y la herramienta SAGA Vegetation Index del software QGIS 3.22.9 (Campos *et al.* 2018). Posteriormente, se evaluó la cobertura forestal con la ecuación de NDVI (ecuación 1) (Meneses-Tovar, 2012):

$$NDVI = \frac{IRC - R}{IRC + R} \quad \text{ecuación 1.}$$

Donde:

NDVI: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada.

R: reflectividad de la región del rojo, luz roja.

IRC: reflectividad de la región infrarrojo, infrarrojo cercano.

El NDVI oscila entre valores negativos (-1) y positivos (+1), según la estructura, fisonomía y densidad de la vegetación (Campaña-Olaya & Tafur, 2021). Los valores negativos corresponden a estados degradados en la cobertura, mientras que los valores positivos representan vegetación vigorosa (López-Pérez *et al.* 2015; Campaña-Olaya & Tafur, 2021).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Percepción de servicios ecosistémicos por actores involucrados.

Los servicios mencionados por los actores se clasificaron con base en la clasificación de SSEE, utilizada por MEA (2005). Las respuestas

obtenidas con las 97 encuestas se pueden agrupar en tres categorías: culturales, de regulación y soporte, y de abastecimiento. La categoría más reconocida por los actores fueron los culturales (54 %), seguida de los de regulación y soporte (32 %) y finalmente los de abastecimiento (14 %). No se encontraron diferencias significativas entre las respuestas de ambos actores al reconocer los SSEE por categoría ($\chi^2_2 = 4,8, p = 0,087$). Esta tendencia coincide con otros estudios, donde los servicios de regulación, como el clima local, la mitigación del efecto de isla de calor y la purificación de aire (Hardin & Jensen, 2007; Gunawardena *et al.* 2017; Matos *et al.* 2019) son menos mencionados por las personas. Asimismo, se coincide con la baja frecuencia de mención de los servicios de apoyo, como la conservación de especies de aves y abejas (Li *et al.* 2016).

También, se ha reportado que en áreas verdes, principalmente dedicadas a la conservación, no se suelen reconocer los servicios de abastecimiento (Quintas-Soriano *et al.* 2018). Los servicios culturales suelen ser los más reconocidos por las personas (Martín-López *et al.* 2014; Garrido *et al.* 2017; García-Llorente *et al.* 2016; Quintas-Soriano *et al.* 2018); entre los ejemplos de servicios culturales más mencionados se encuentran el ser espacios para realizar ejercicio, proveer tranquilidad, descanso y salud mental (Nesbitt *et al.* 2017; Ngulani & Shackleton, 2019).

Aun cuando las encuestas a colaboradores cuentan con mayor número de respuestas, fueron los visitantes quienes reconocieron una mayor variedad de SSEE (Figura 2a); en particular, la categoría de abastecimiento presenta la mayor diversidad (10 bienes y servicios identificados Figura 2b), seguidos por los SSEE culturales (Figura 2c) y, finalmente, los que fueron igualmente mencionados por sus beneficios de regulación y de soporte del socioecosistema (Figura 2d).

Se encontró previamente que en sitios con un manejo ecoturístico, los turistas/visitantes reconocen los servicios culturales, como recreación, espiritualidad y bienestar social; que estas áreas naturales brindan, lo que coincide con las respuestas de los visitantes y de los colaboradores del PEBE ($\chi^2_{20} = 27,67, p = 0,12$). Entre los servicios culturales más mencionados se encontraron el ecoturismo, la belleza escénica, la conexión con la naturaleza y la relajación. Afortunadamente, para el manejo sustentable de estas áreas, tanto visitantes como las personas encargadas del manejo de áreas naturales, reconocen y buscan mantener este tipo de servicios (Menzel & Teng, 2010; Nahuelhual *et al.* 2013).

Por su parte, los SSEE de abastecimiento fueron los que presentaron mayor diversidad de respuestas. Aunque el ANP incluye, como actividad productiva, solamente las plantaciones forestales comerciales de árboles de navidad; tanto visitantes como colaboradores reconocieron otras formas de extracción de recursos en bosques semejantes. Precisamente, la relevancia de este tipo de SSEE, se suele asociar con el aprovechamiento de recursos naturales; un ejemplo se puede reconocer en la importancia de humedales en función de la producción pesquera (Bautista Gómez *et al.* 2023; Hernández Marmol *et al.* 2024). Si bien el aprovechamiento de recursos naturales los vincula con el bienestar, su preponderancia puede sesgar las políticas públicas hacia una perspectiva utilitarista, que ignora la diversidad de factores necesarios para la provisión de SSEE (Mujica, 2022).

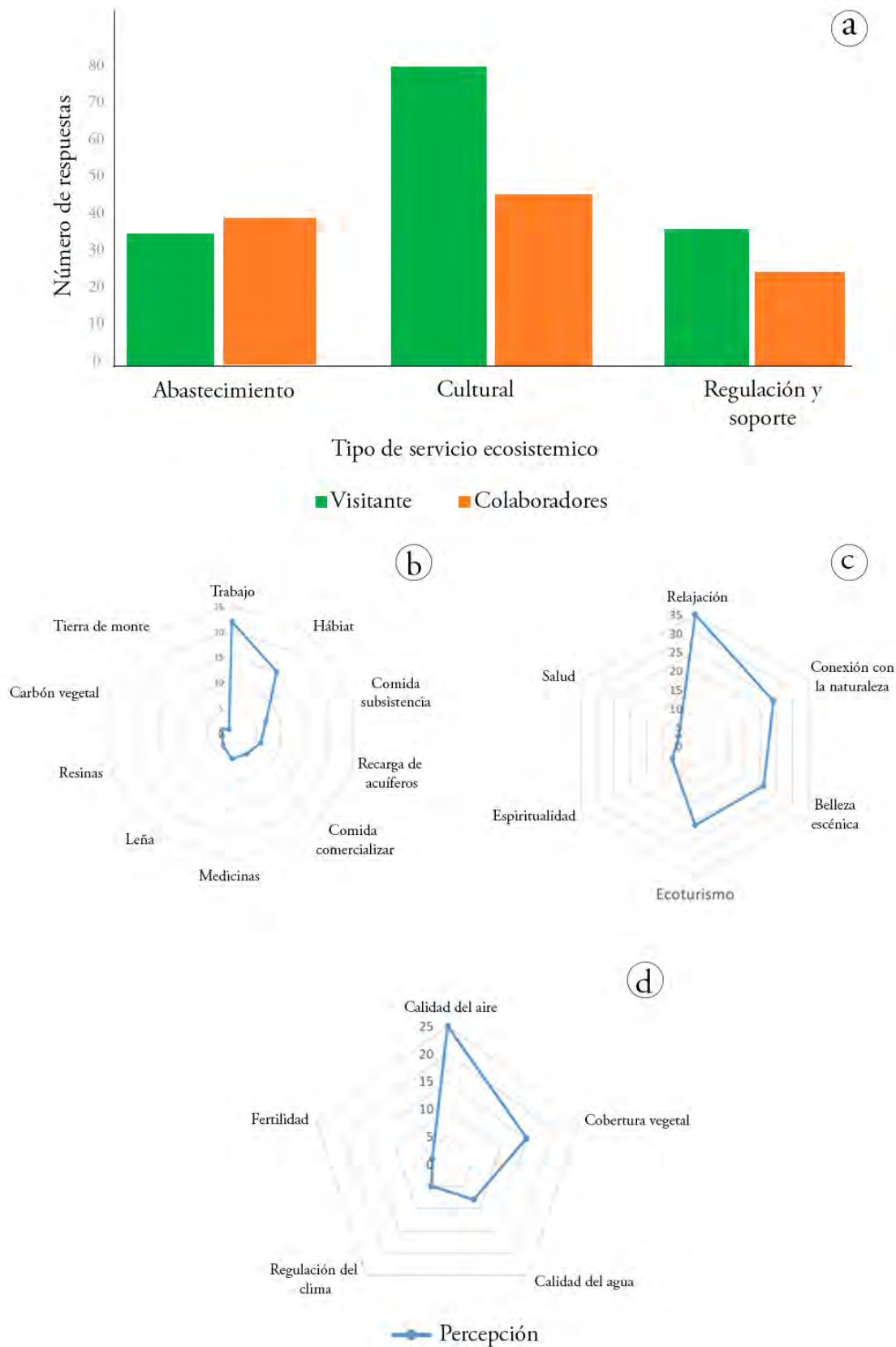


Figura 2. a) Número de respuesta al identificar servicios ecosistémicos dentro del Parque Ecoturístico Bosque Esmeralda por visitantes (verde) y colaboradores (azul). Asimismo, se muestra el número de respuestas de ambos tipos de actores, para los servicios reconocidos por categoría de servicio ecosistémico; b) abastecimiento; c) culturales y d) regulación y soporte.

Evaluación de cambio de cobertura forestal. Los patrones de cambio en la cobertura forestal se registraron con valores de NDVI, considerando que valores bajos de NDVI se relacionan con áreas carentes de vegetación o sin ella (0,1 a 0,2), mientras que valores mayores a 0,4 denotan zonas con cobertura forestal o pastizal. Los valores negativos se relacionan con la presencia de áreas perturbadas o urbanas. Los registros para el PEBE reflejan el cambio en las prácticas de manejo del territorio. Entre 1981 y 1991 (Figura 3 a y b), se mantuvo como vegetación ligera con mayor frecuencia de píxeles que las zonas con vegetación perturbada. En los años posteriores al 2000 (Figura 3 c, d y e), los valores reflejan

una condición vigorosa en la cobertura, lo que concuerda con la implementación del parque como actividad ecoturística. A partir de ello, se comienzan campañas de reforestación, aprovechamiento maderable sustentable y la construcción de cabañas para alojar a los turistas. De acuerdo con la percepción de colaboradores del PEBE y habitantes del ejido Emiliano Zapata, los registros de NDVI confirman la reconversión productiva desde aprovechamiento agrícola intensivo antes de 2000 y la operación del PEBE, a partir del 2012, con reforestaciones y de 2014, con la venta de árboles de navidad, lo que permitió añadir programas de manejo y de conservación forestal.

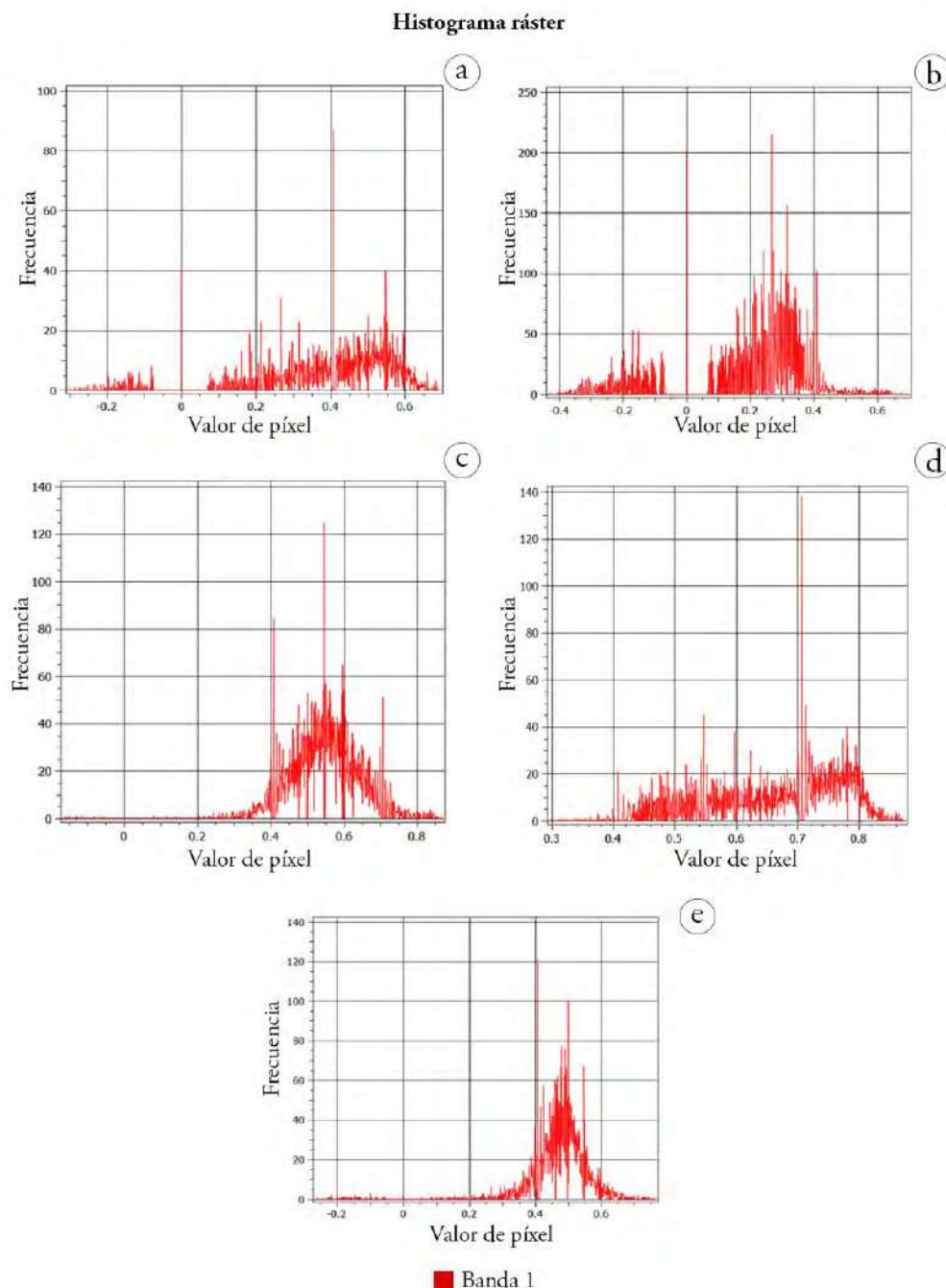


Figura 3. Histogramas de los valores promedios anuales de NDVI para el Parque ecoturístico Bosque Esmeralda. a) 1981; b) 1991; c) 2000; d) 2010 y e) 2020. Mientras más compactas este la dispersión del histograma, indica una mejor cobertura forestal, lo que se observa que para el 2020, la calidad de la vegetación ha mejorado en comparación con los años anteriores.

Asimismo, a través de la percepción de colaboradores y habitantes, se pudo notar que para ellos fue alentador observar cómo sus esfuerzos de conservación y de manejo del bosque se reflejaba en mejores valores de cobertura forestal. Es importante favorecer y enriquecer los esfuerzos realizados por estos tipos de comunidades, que tienen una iniciativa propia en conservar sus áreas naturales. En estudios donde se han evaluado el éxito de estrategias de conservación de áreas forestales, se recomienda que para que este tipo de estrategias funcionen a largo plazo, primero, se integre la colaboración entre comunidades locales, academia y organizaciones civiles o gubernamentales; en segundo lugar, que se deben alinear las estrategias con las políticas y herramientas gubernamentales y, finalmente, que se generen puentes de comunicación para compartir información de los resultados y el aprendizaje generado con las estrategias (Evans *et al.* 2022).

Los servicios reconocidos que brinda el PEBE, tanto por visitantes como por colaboradores del parque, coinciden con un manejo ecoturístico, donde se da prioridad a la búsqueda de relajación y belleza escénica, como los principales servicios mencionados. Adicionalmente, los colaboradores reconocen un servicio de abastecimiento, al ser este parque su fuente de trabajo e ingresos.

La calidad de la vegetación obtenida con el NDVI demuestra que ha aumentado desde que comenzó a funcionar el PEBE como parque ecoturístico, lo que demuestra que, dentro de él, han sido clave las estrategias de reforestación, de conservación y de manejo sustentable, que han realizado sus integrantes. Estas acciones han permitido mejorar la calidad de sus bosques, lo que ha repercutido en un aumento de visitantes y, por ende, mayor ingreso para sus familias.

Faltan todavía estrategias que ayuden a sensibilizar y educar a sus visitantes y a los mismos colaboradores, para lidiar con el impacto que generan las actividades ecoturísticas. Esto se observa, sobre todo, durante las temporadas de mayor afluencia, ya que se genera una gran cantidad de residuos y aumenta la compactación del suelo en áreas dedicadas a la conservación. En este sentido, se pueden desarrollar talleres de educación ambiental y materiales visuales, para que trabajadores y visitantes tengan un mejor conocimiento de lo que representa un área natural y su conservación. Además, se puede desarrollar señalética acorde a las necesidades del PEBE, lo que permitirá una mejor conservación de los bosques y, en consecuencia, una disponibilidad de SSEE a la creciente urbanización que, cada vez, gana más espacio a las áreas naturales.

Agradecimientos. Los autores agradecen al Instituto Tecnológico de Gustavo A. Madero, por permitir el uso de sus instalaciones para el desarrollo del trabajo de gabinete de este proyecto. Además, agradecen profundamente el apoyo del ejido Emiliano Zapata y al personal del Parque Ecoturístico Bosque Esmeralda, por facilitar el desarrollo de la presente investigación. Asimismo, la colaboración incondicional de la bióloga Montserrat Godínez, la ingeniera Mariam Javier y el C. Iván Martínez. **Financiamiento:** Financiamiento propio y aportación del ITGAM. **Conflicto de intereses:** El presente manuscrito fue preparado y revisado por todos los autores enlistados, que declaramos no tener conflicto de

intereses que genere un riesgo en la validación de los resultados. **Contribución de los autores:** La coordinación del proyecto fue realizada por Sofía Ochoa López; la concepción inicial del artículo fue diseñada por Carlos Peralta Olmedo; la redacción y edición del artículo fue realizada por Sofía Ochoa López, Javier Guzmán Sánchez y Carlos Peralta Olmedo.

REFERENCIAS

- ACOSTA MIRELES, M.; CARRILLO ANZURES, F.; DELGADO, D.; VELASCO BAUTISTA, E. 2014. Establecimiento de parcelas permanentes para evaluar impactos del cambio climático en el Parque Nacional Iztapopopo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*. 5(26):6-29. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v5i26.287>
- ALCARAZ-SEGURA, D.; BALDI, G.; DURANTE, P.; GARBULSKY, M.F. 2008. Análisis de la dinámica temporal del NDVI en áreas protegidas: tres casos de estudio a distintas escalas espaciales, temporales y de gestión. *Ecosistemas*. 17(3):108-117.
- ALMEIDA-LEÑERO, L.; NAVA, M.; RAMOS, A.; ESPINOSA, M.; ORDOÑEZ, M.J.; JUJNOVSKY, J. 2007. Servicios ecosistémicos en la cuenca del río Magdalena, Distrito Federal, México. *Gaceta Ecológica*. 85:53-64.
- BALVANERA, P.; COTLER, H. 2009. Estado y tendencias de los servicios ecosistémicos. En: Sarukhán, J.; Dirzo, R.; González, R.; March, I.J. *Capital natural de México. Volumen II: Estado de conservación y tendencias de cambio*. Conabio. México. p.185-245.
- BAUTISTA GÓMEZ, G.; MANJARREZ, P.L.; CRUZ CÁRDENAS, G. 2023. Evaluación de la percepción social de los valores, usos y problemática del sistema humedal-urbano en Mazatlan, Sinaloa. *Impluvium*. 25:83-90.
- BONFIL JIMÉNEZ, U.; RIBEIRO PALACIOS, M. 2022. Mercantilización de las áreas naturales protegidas y gentrificación verde metropolitana. El caso de la ciudad de Querétaro, México. *PACHA. Revista De Estudios Contemporáneos Del Sur Global*. 3(9):147. <https://doi.org/10.46652/pacha.v3i9.147>
- BONILLA-BEDOYA, S.; MORA, A.; VACA, A.; ESTRELLA, A.; HERRERA, M.Á. 2020. Modelling the relationship between urban expansion processes and urban forest characteristics: An application to the Metropolitan District of Quito. *Computers, Environment and Urban Systems*. 79:101420. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2019.101420>
- CALDERÓN CONTRERAS, R.C. 2016. El rol de las áreas naturales periurbanas para la resiliencia al cambio climático de las metrópolis: el caso de la ciudad de México. *Revista Iberoamericana de Economía Ecológica*. 25:69-79.

- CAMPAÑA-OLAYA, J.; TAFUR, E.G. 2021. Análisis multitemporal mediante SIG de la sequía y la deforestación en la Reserva Nacional de Tumbes-Perú, 1986-2019. *Manglar*. 18(3):267-274.
- CAMPOS, A.; GUERRERO, E.; GINES, E. 2018. Evolución de la cobertura vegetal en el Parque Nacional Cerros de Amotape de Tumbes, utilizando el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI): 2000-2014. *Manglar*. 15(1):47-56.
- CASTILLO, A.V.; CORRAL, E.; GONZÁLEZ, L.; PARÉ, M.; PAZ, J.; REYES, Y.; SCHTEINGART, M. 2009. Conservación y sociedad. En: Sarukhán, J.; Dirzo, R.; González, R.; March, I.J. *Capital natural de México. Volumen II: Estado de conservación y tendencias de cambio*. Conabio. México. p.761-801.
- COMISIÓN NACIONAL DE ÁREAS NATURALES PROTEGIDAS, CONANP. 2013. Programa de Manejo Parque Nacional Iztacihuatl Popocatepetl. 185p.
- COMISIÓN NACIONAL DE ÁREAS NATURALES PROTEGIDAS, CONANP; DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT, GIZ. 2017. Valoración de los Servicios Ecosistémicos del Parque Nacional Iztacihuatl-Popocatepetl. Ciudad de México. Proyecto de Valoración de Servicios Ecosistémicos de Áreas Naturales Protegidas Federales de México: una herramienta innovadora para el financiamiento de biodiversidad y cambio climático. EcoValor. México. 112p.
- CORNEJO-LATORRE, C.; CALDERÓN-PATRÓN, J.M.; SUAREZ-RAMÍREZ, L. 2014. Los servicios ambientales y la biodiversidad. *Investigación ambiental Ciencia y política pública*. 6(1):53-60.
- COSTANZA, R.; D'ARGE, R.; DE GROOT, R.; FARBER, S.; GRASSO, M.; HANNON, B.; LIMBURG, K.; NAEEM, S.; O'NEILL, R.V.; PARUELO, J.; RASKIN, R.G.; SUTTON, P.; VAN DEN BELT, M. 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*. 387:253-260.
- DÍAZ, S.; DEMISSEW, S.; CARABIAS, J.; JOLY, C.; LONSDALE, M.; ASH, N.; LARIGAUDERIE, A.; ADHIKARI, J.R.; ARICO, S.; BÁLDI, A.; BARTUSKA, A.; ANDREAS BASTE, I.; BILGIN, A.; BRONDIZIO, E.; MA CHAN, K.; FIGUEROA, V.E.; DURAIAPPAH, A.; FISCHER, M.; HILL, R.; KOETZ, T.; ...ZLATANOVA, D. 2015. The IPBES conceptual framework -connecting nature and people. *Current Opinion in Environmental Sustainability*. 14:1-16. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2014.11.002>
- DÍAZ, S.; PASCUAL, U.; STENSEKE, M.; MARTÍN-LÓPEZ, B.; WATSON, R.T.; MOLNÁR, Z.; HILL, R.; CHAN, K.M.A.; BASTE, I.A.; BRAUMAN, K.A.; POLASKY, S.; CHURCH, A.; LONSDALE, M.; LARIGAUDERIE, A.; LEADLEY, P.W.; VAN OUDENHOVEN, A.P.E.; VAN DER PLAAT, F.; SCHRÖTER, M.; LAVOREL, S.; ...SHIRAYAMA, Y. 2018. Assessing nature's contributions to people. *Science*. 359:270-272. <https://doi.org/10.1126/science.aap8826>
- DÍAZ-PINZÓN, L.; SIERRA, L.; TRILLAS, F. 2022. The economic value of wetlands in urban areas: the benefits in a developing country. *Sustainability*. 14:8302. <https://doi.org/10.3390/su14148302>
- EVANS, K.; MELI, P.; ZAMORA-CRISTALES, R.; SCHWEIZER, D.; MÉNDEZ-TORIBIO, M.; GÓMEZ-RUIZ, P.A.; GUARIGUATA, M.R. 2022. Drivers of success in collaborative monitoring in forest landscape restoration: an indicative assessment from Latin America. *Restoration Ecology*. 31(4):e13803. <https://doi.org/10.1111/rec.13803>
- FOLKE, C. 2006. The economic perspective: conservation against development versus conservation for development. *Conservation Biology*. 20(3):686-688.
- GARCÍA RODEA, L.F.; ORTIZ, H.T.; GONZÁLEZ-DOMÍNGUEZ, I.; LÓPEZ-CARRÉ, E. 2023. Análisis del perfil del turista y su relación con la demanda de turismo rural en el Estado de México (México). *El Periplo Sustentable*. 44:85-104. <https://doi.org/10.36677/elperiplo.v0i44.16266>
- GARCÍA-LLORENTE, M.; CASTRO, A.J.; QUINTAS-SORIANO, C.; LÓPEZ, I.; CASTRO, H.; MONTES, C.; MARTÍN-LÓPEZ, B. 2016. The value of time in biological conservation and supplied ecosystem services: a willingness to give up time exercise. *Journal of Arid Environments*. 124:13-21. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaridenv.2015.07.004>
- GARRIDO, P.; ELBAKIDZE, M.; ANGELSTAM, P. 2017. Stakeholders' perceptions on ecosystem services in Östergötland's (Sweden) threatened oak wood-pasture landscapes. *Landscape and Urban Planning*. 158:96-104. <http://dx.doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.08.018>
- GUNAWARDENA, K.R.; WELLS, M.J.; KERSHAW, T. 2017. Utilising green and bluespace to mitigate urban heat island intensity. *Science of The Total Environment*. 584-585:1040-1055.
- HARDIN, P.J.; JENSEN, R.R. 2007. The effect of urban leaf area on summertime urban surface kinetic temperatures: a Terre Haute case study. *Urban Forestry & Urban Greening*. 6:63-72. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2007.01.005>
- HERNÁNDEZ MARMOL, D.; BALLESTEROS PELEGRÍN, G.A.; BELMONTE SERRATO, F. 2024. Evaluación socioeconómica y de los servicios ecosistémicos en el Parque

- Regional de las Salinas y Arenales de San Pedro del Pinatar (Murcia, SE España). *Anales de Geografía*. 44(1):107-130. <https://doi.org/10.5209/aguc.94205>
- HERNÁNDEZ-GARCÍA, M.A.; GRANADOS-SÁNCHEZ, D. 2006. El Parque Nacional Iztaccíhuatl- Popocatepetl-Zoquiapan y el impacto ecológico-social de su deterioro. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 12(2):101-109.
- INTERGOVERNMENTAL SCIENCE-POLICY PLATFORM ON BIODIVERSITY AND ECOSYSTEM SERVICES, IPBES. 2019 Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. Alemania. 56p. Disponible desde Internet en: https://ipbes.net/sites/default/files/2020-02/ipbes_global_assessment_report_summary_for_policymakers_en.pdf
- LAGUNAS-VÁZQUES, M.; BELTRÁN-MORALES, L.F.; BOBADILLA-JIMÉNEZ, M.; ORTEGA-RUBIO, A. 2016. Población humana, actividades socioeconómicas y problemáticas socioambientales de las Áreas Naturales Protegidas (ANP) de México. *Áreas Naturales Protegidas Scripta*. 2(2):67-89.
- LAZOS, E.; PARÉ, L. 2000. Miradas indígenas sobre una naturaleza entristecida Percepciones del deterioro ambiental entre nahuas del sur de Veracruz. UNAM- Plaza y Valdés Editores. México. 220p.
- LI, S.; COLSON, V.; LEJEUNE, P.; VANWAMBEKE, S.O. 2016. On the distance travelled for woodland leisure via different transport modes in Wallonia, south Belgium. *Urban Forestry & Urban Greening*. 15:123-132. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2015.12.007>
- LÓPEZ-PÉREZ, A.M.R.; MARTÍNEZ, M.; FERNÁNDEZ, R. 2015. Priorización de áreas de intervención mediante análisis morfométrico e índice de vegetación. *Tecnología y Ciencias del Agua*. 6(1):212-137.
- MAASS, M.J. 2007. El manejo de socioecosistemas. En: Calva, J.L. Cambio climático y políticas de desarrollo sustentable. Tomo 14. Juan Pablos Editor-Consejo Nacional de Universitarios. México. p.267-290.
- MARTÍNEZ-TRINIDAD, T.; HERNÁNDEZ LÓPEZ, P.; LÓPEZ-LOPEZ, S.F.; MOHEDANO CABALLERO, L. 2021. Diversidad, estructura y servicios ecosistémicos del arbolado en cuatro parques de Texcoco mediante i-Tree Eco. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*. 12(67). <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i67.880>
- MARTÍN-LÓPEZ, B.; GÓMEZ-BAGGETHUN, E.; GARCÍA-LLORENTE, M.; MONTES, C. 2014. Trade-offs across value-domains in ecosystem services assessment. *Ecological Indicators*. 37:220-228. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.03.003>
- MARTÍN-LÓPEZ, B.; GONZÁLEZ, J.A.; DÍAZ, S.; CASTRO, I.; GARCÍA-LLORENTE, M. 2007. Biodiversidad y bienestar humano: el papel de la diversidad funcional. *Revista Ecosistemas*. 16(3):69-80.
- MATOS, P.; VIEIRA, J.; ROCHA, B.; BRANQUINHO, C.; PINHO, P. 2019. Modeling the provision of air-quality regulation ecosystem service provided by urban green spaces using lichens as ecological indicators. *Science of The Total Environment*. 665:521-530. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.023>
- MENESES-TOVAR, C.L. 2012. El índice normalizado diferencial de la vegetación como indicador de la degradación del bosque. *Unasyuva: Revista internacional de silvicultura e industrias forestales*. 62:39-46.
- MENZEL, S.; TENG, J. 2010. Ecosystem services as a stakeholder-driven concept for conservation science. *Conservation Biology*. E.U.A. 24(3):907. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2009.01347.x>
- MERINO PÉREZ, L. 2014. Perspectivas sobre la gobernanza de los bienes y la ciudadanía en la obra de Elinor Ostrom. *Revista Mexicana de Sociología*. 76(n.spe):77-104.
- MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT, MEA. 2005. Ecosystems and human well-being: multivolume set. Island Press, Washington, DC. Disponible desde Internet: <http://www.millenniumassessment.org/en/index.aspx>
- MONÁRREZ-GONZÁLEZ, J.C.; PÉREZ-VERDÍN, G.; LÓPEZ-GONZÁLEZ, C.; MÁRQUEZ-LINARES, M.A.; GONZÁLEZ-ELIZONDO, M.D.S. 2018. Efecto del manejo forestal sobre algunos servicios ecosistémicos en los bosques templados de México. *Madera y Bosques*. 24(2):e2421569. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2421569>
- MONTOYA-RODRÍGUEZ, A.E.; ALONSO-NAVARRETE, A. 2024. Comunidades sustentables: una alternativa para los asentamientos humanos en áreas naturales en la periferia de la Ciudad de México. *Arquitectonics: Mind, Land & Society*. 35:213-233.
- MUJICA, C.M. 2022. Contribuciones para la comprensión de la relación sociedad-naturaleza. *Journal de Ciencias Sociales*. 10(19):110-114. <https://doi.org/10.18682/jcs.vi19.7343>

- NAHUELHUAL, L.; CARMONA, A.; LOZADA, P.; JARAMILLO, A.; AGUAYO, M. 2013. Mapping recreation and ecotourism as a cultural ecosystem service: an application at the local level in Southern Chile. *Applied Geography*. 40:71-82. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2012.12.004>
- NESBITT, L.; HOTTE, N.; BARRON, S.; COWAN, J.; SHEPPARD, S.R.J. 2017. The social and economic value of cultural ecosystem services provided by urban forests in North America: a review and suggestions for future research. *Urban For. Urban Green*. 25:103-111. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.05.005>
- NGULANI, T.; SHACKLETON, C.M. 2019. Use of public urban green spaces for spiritual services in Bulawayo, Zimbabwe. *Urban Forestry & Urban Greening*. 38:97-104. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2018.11.009>
- PEREVOCHTCHIKOVA, M.; FLORES, J.Á.H.; MARÍN, W.; FLORES, A.L.; BUENO, A.R.; NEGRETE, I.A.R. 2019. Systematic review of integrated studies on functional and thematic ecosystem services in Latin America, 1992-2017. *Ecosystem Services*. 36:100900. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2019.100900>
- PÉREZ-HERRERA, L.; NERIA-HERNÁNDEZ, T.; RODRÍGUEZ-RUIZ, J. 2018 Campo instrumental hídrico en las megaciudades de América Latina durante la actual etapa neoliberal. Una mirada inicial. *Revista de Ingeniería y Tecnologías para el Desarrollo Sustentable*. 4(2018):1-8.
- QUÉTIER, F.; TAPELLA, E.; CONTI, G.; CÁCERES, D.; DÍAZ, S. 2007. Servicios ecosistémicos y actores sociales. Aspectos conceptuales y metodológicos para un estudio interdisciplinario. *Gaceta Ecológica*. 84-85:17-26.
- QUINTAS-SORIANO, C.; BRANDT, J.S.; RUNNING, K.; BAXTER, C.V.; GIBSON, D.M.; NARDUCCI, J.; CASTRO, A.J. 2018. Social-ecological systems influence ecosystem service perception: a Programme on Ecosystem Change and Society (PECS) analysis. *Ecology and Society*. 23(3):3. <https://doi.org/10.5751/ES-10226-230303>
- R CORE TEAM. 2023. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Disponible desde Internet en: <https://www.R-project.org/>
- RODRÍGUEZ SÁNCHEZ, E.P.; MORA SANTIAGO, E.; QUIROZ GUEVARA, A.L.; CRUZ CABRERA, S.V.; PEÑA-BECERRIL, J.C.; OLVERA-SULE, D.A. 2019. Aproximación a la valoración de los servicios ecosistémicos del bosque de Capulálpán de Méndez, Oaxaca, como herramienta para su conservación. *Acta Universitaria*. 29:e2002. <https://doi.org/10.15174/au.2019.2002>
- RODRÍGUEZ, E.A.; RAMÍREZ, D.; BALCÁZAR, J.L.; JIMÉNEZ, J.N. 2021. Metagenomic analysis of urban wastewater resistome and mobilome: A support for antimicrobial resistance surveillance in an endemic country. *Environmental Pollution*. 276:116736.
- SECRETARÍA DEL MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES, SEMARNAT. 2004. Documento estratégico rector del Inventario Nacional Forestal y de Suelos. 26p. Disponible desde Internet en: <https://idefor.cnf.gob.mx/documents/846/download>
- URQUIZA GARCÍA, J.H. 2019. Una historia ambiental global: de las reservas forestales de la nación a las reservas de la biosfera en México. Iztapalapa. *Revista de ciencias sociales y humanidades*. 40(87):101-134. <https://doi.org/10.28928/ri/872019/atc4/urquizagarciah>

Assessing the circularity potential of plastics with a substitutability approach: A case study in Argentina

Evaluación del potencial de circularidad de los plásticos con enfoque de sustituibilidad: caso de Estudio en Argentina

María Agustina Zapata^{1,2*} ; Fernando Arce Bastias^{1,2} ; Bárbara Civit^{1,2} ; Pablo Arena^{1,2} 

¹Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Mendoza, Grupo CLIOPE - Ambiente, energía y desarrollo sustentable. Mendoza, Argentina; e-mail: azapata@mendoza-conicet.gob.ar; farcebastias@mendoza-conicet.gob.ar; bcivit@frm.utn.edu.ar; aparena@frm.utn.edu.ar

²Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas CONICET-CCT Mendoza. Mendoza, Argentina.

*corresponding autor: azapata@mendoza-conicet.gob.ar

How to cite: Zapata, M.A.; Arce Bastias, F.; Civit, B.; Arena, P. 2025. Assessing the circularity potential of plastics with a substitutability approach: A case study in Argentina. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 28(1):e2631. <http://doi.org/10.31910/rudca.v28.n1.2025.2631>

Open access article published by Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, under a Creative Commons CC BY-NC 4.0 License.

Official publication of the Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, a Higher Education Institution Accredited of High Quality by the Ministry of National Education.

Received: March 30, 2024

Accepted: January 21, 2025

Edited by: Luz Piedad Romero

ABSTRACT

Resource depletion, greenhouse gas emissions, and pollution associated with production, consumption, and disposal of plastics demand solutions. Material circularity is presented as a key strategy to address this problem. However, a comprehensive study of these systems is needed to determine whether it is possible to completely close the material loop. When evaluating plastics recycling as a circularity strategy, it is essential to consider the conservation of mass in the cycle and the conservation of quality. In this sense, substitutability is a concept that measures the ability of the recycled material to replace virgin material. This paper presents the results of the circularity potential of six main types of plastics for five scenarios in Argentina, based on recycling rates and market shares to measure the conservation of quantity and quality in the material cycle. The results show a low circularity potential for all plastics, the best indicator being 13.6% for HDPE and the worst being 3% for PS.

Keywords: Circular economy; High-density polyethylene; Material cycle; Plastic materials; Plastic recycling.

RESUMEN

El agotamiento de recursos, las emisiones de gases de efecto invernadero y la contaminación asociada con la producción, consumo y disposición final de plásticos requieren la búsqueda de soluciones. La circularidad de los materiales se presenta como una estrategia clave para abordar este problema. Sin embargo, se necesita un estudio integral de estos sistemas para determinar si es posible cerrar completamente el ciclo de los materiales. Al evaluar el reciclaje de plásticos como una estrategia de circularidad, es esencial considerar no solo la conservación de masa en el ciclo, sino también la conservación de calidad. En este sentido, la sustituibilidad es un concepto que mide la capacidad del material reciclado para reemplazar al material virgen. Este artículo presenta los resultados del potencial de circularidad de seis tipos principales de plásticos para cinco escenarios en Argentina, basados en tasas de reciclaje y cuotas de mercado para medir la conservación de cantidad y calidad en el ciclo de materiales. Los resultados muestran un bajo potencial de circularidad para todos los plásticos, siendo el mejor indicador del 13,6 % para HDPE y el peor del 3 % para PS.

Palabras clave: Ciclo de materiales; Economía circular; Materiales plásticos; Polietileno de alta densidad; Reciclaje de plásticos.

INTRODUCTION

According to the United Nations Environment Programme, plastic production has grown faster than any other material since 1970. If historic growth trends continue, global production of primary plastic is forecasted to reach 1,100 million tons by 2050.

Since 1950, approximately 9.2 billion tons of plastic have been produced, generating some 6.9 billion tons of primary plastic waste. Over three-quarters of this plastic waste was discarded and ended up in landfills, dumps, uncontrolled or mismanaged waste streams, or the natural environment, including the oceans. Currently, it is estimated that 19-23 million tons of plastic leak into aquatic ecosystems annually – from lakes to rivers to seas – from land-based sources (UNEP-LEAP, n.d.).

The production and consumption of plastics in the Latin American region have grown significantly over the last four decades. Nowadays, the average consumption exceeds 30 kg per capita per year. Mexico and Chile, two countries with the highest per capita plastic consumption, consume more than 50 kg per capita per year, followed by Argentina and Brazil, with figures close to 40 kg per capita per year (Bianco *et al.* 2021).

A systemic change is necessary to prevent the negative impact of extracting raw materials and plastic waste from affecting the environment. The circular economy (CE) emerges as a potential solution, with “circularity of materials” referring to strategies that promote the creation of material loops - a fundamental concept in CE. The CE could be defined as a new model of economic development that promotes the maximum reuse/recycling of materials, goods, and components to minimize waste generation. It aims to innovate the entire chain of production, consumption, distribution, and recovery of materials and energy according to a “cradle to cradle” vision. (Ghisellini *et al.* 2018).

Different strategies exist for restoring material flows, such as repair, preserving the product as a whole, refurbishing, preserving the use of components, or recycling the material as a last resort. In this context, circularity is defined as the ability to conserve the quantity and the quality of the material (Bracquené *et al.* 2022)

To achieve complete closure of plastic polymer loops, it is necessary to recycle recovered plastic materials into new products of equivalent quality to the original plastic articles, essentially within applications that match those of the initial products. Commonly referred to as downcycling, when higher quality plastics are recycled into lower-quality applications. This process involves significant losses in material properties compared to virgin plastic.

Recycling operations incur material losses resulting from two main factors: the loss of material quantity, also known as physical material loss during the recycling process and the loss of material quality. The latter is associated with the deterioration of the physical properties of recycled materials and reduced functionality compared to virgin plastics (Cullen *et al.* 2017).

Various indicators, including the circularity potential (CP) indicator (Eriksen *et al.* 2019), have been proposed to assess both quantity and quality losses in recycling.

Material quantity losses include dynamic losses in material stock and material dissipative losses (Cullen *et al.* 2017). The material stock dynamic losses are a consequence of the product's lifespan. This is particularly relevant in the case of plastic items, which are only eligible for recycling at the end of their useful life. In contrast, dissipative losses pertain to the portion of the material that cannot be preserved as a secondary raw material (Schulte *et al.* 2023).

Assessment of material losses can be conducted indirectly through material conservation, which involves evaluating the resource recovery efficiency of the material in question. This resource recovery efficiency is expressed as the ratio of recycled material to material available for recycling (waste generated from the material), considering both dynamic and dissipative losses throughout the recovery and recycling process.

The loss of material quality is associated with the concepts of quality preservation and the notion of “substitutability”. Quality conservation can partially be described through the tightness of the material cycle, which encourages maintaining products (and components) at their highest level of value for as long as possible (Bracquené *et al.* 2022).

In this context, “substitutability” refers to the ability of one material to replace another in a particular application. The life cycle assessment (LCA), according to ISO 2006, is a methodology that allows evaluating the environmental performance of a product or system, covering multiple impact categories from raw material extraction through manufacturing and distribution to use and potential end-of-life disposal alternatives, thus providing a comprehensive profile of its environmental impact. In the context of LCA and recycling, substitutability is used to evaluate the potential of recycled materials to substitute virgin materials. The calculation of substitutability can be based on material technical properties, recycling cycles, and economic factors such as market shares or price disparities. The complexity of the calculation can vary from a simple ratio to a more elaborate mathematical operation involving multiple variables. The concept of substitutability is still evolving, and there is a need for harmonization, transparency, and consideration of the application of recycled materials in its evaluation (Sanabria Garcia *et al.* 2023).

The CP indicator considers the efficiency of resource recovery and the quality of recycled materials, variables strongly influenced by local factors. These include waste separation schemes, collection systems, recycling plant technology, and social characteristics such as environmental education, recycling incentives, and regulations.

Despite global efforts to evaluate the circularity of plastics, there is a notable lack of studies focusing on the Latin American context, where unique socio-environmental and market characteristics present challenges and opportunities for circular strategies. Specifically, no prior research has comprehensively assessed the CP of plastics in Argentina.

This study addresses these gaps by applying the CP indicator for the first time in Argentina, integrating local data, and simulating alternative scenarios to explore strategies for improving material circularity. The objective is to calculate the CP based on recovery efficiencies and substitutability under Argentine local conditions for different types of plastics, including polyethylene terephthalate (PET), low-density polyethylene (LDPE), high-density polyethylene (HDPE), polyvinyl chloride (PVC), polypropylene (PP), polystyrene (PS), and expanded polystyrene (EPS). In addition to the baseline scenario, alternative scenarios were analyzed, modeling varying proportions of medium- and low-quality recycled materials.

MATERIALS AND METHODS

Circularity potential indicator. Eriksen *et al.* (2019) defined CP as the capability of a recovery and recycling system to close material loops under stable market conditions. As explained in the previous section, CP depends on the recovery system's efficiency and substitutability.

The resource recovery efficiency, η^{rec} , was calculated by adapting the equation described by Vadenbo *et al.* (2016) and is presented in Equation 1.

$$\eta_i^{rec} = \frac{M_i^{rec}}{U_i^{rec}} \quad \text{equation 1}$$

Where:

η^{rec} is the resource recovery efficiency, including all physical material losses within the recycling chain.

U^{rec} [kg] is the resource potential of recovered material and expresses the amount of material in the waste stream under assessment.

M^{rec} [kg] is the amount of material recovered from the total system, which includes waste collection and recycling.

i is the type of plastic (e.g. PET, LDPE, HDPE, PVC, PP, PS, and EPS).

The term associated with quality preservation, substitutability, represents the materials with a specific quality level (Q) that have the potential to substitute virgin material and is expressed as a function of Market Share (MS). The quality of the potentially displaced virgin material is denoted as Q^{disp} , and it is always assumed to be of high quality, with $MS(Q^{disp})$ being equal to 1 for all plastics.

The substitutability is defined by Vadenbo *et al.* (2016), where the functionality of the recovered material is divided by the functionality of the displaced material. In this case, when considering circularity potential in a hypothetical market scenario with closed polymer loops operating under steady-state conditions, the functionality is represented by the fraction of the total polymer market within which the recovered plastic with a specific quality is applicable and

can fulfill the material requirements. As explained in the previous section, this concept signifies that functionality now denotes the potential of a recovered material fraction to satisfy demands within a steady-state market, aligning with the vision of a circular economy.

Therefore, the equation for CP is presented in Equation 2.

$$CP_i = \eta_i^{rec} \times \frac{MS(Q^{rec})_i}{MS(Q^{disp})_i} \quad \text{equation 2}$$

Where:

CP_i is the Circular Potential for plastic i .

MS The market share represents the mass percentage of each plastic, used within each application group, categorized as high, medium, and low for each respective quality level (high, medium, and low).

Application groups and quality classification. Understanding that there are different types of recycling and qualities of recycled plastic. Eriksen *et al.* (2019), based on existing literature and legislation related to the use of plastics, identify eight application groups. These application groups are further classified into three quality levels, as defined by the authors: 1) high quality, assigned to materials approved for food contact, representing the strictest legal requirements for materials; 2) medium quality, assigned to materials that can be used in toys, electrical and electronic products, representing lower and variable legal requirements, and 3) low quality, assigned to materials with minimal legal requirements such as construction, non-food packaging, automotive industry, and others.

For Argentina, a modification has been made according to local regulations; the pharmaceutical and medical industry has high legal standards, so this application is considered high quality. The "Agro" category has also been added to the low-quality application group. Information of Table 1 provides more details of the normative used for classification.

The methodology establishes that a material is considered high quality if it can meet all the demands of the plastic market across all defined application groups. In contrast, recovered medium or low-quality polymers can only fulfill specific application fields.

In terms of definition, virgin plastic is classified as high quality since its composition can be controlled during production to tailor it to the corresponding application. Only those recovered polymers of high quality have the potential to replace virgin plastic completely throughout the entire cycle. The CP exposes that even if all plastic waste were recycled, it would not be enough to close the material loop due to the quality required in the different fields of application, generating dependence on virgin material.

The Market shares are shown in Table 2; values were estimated based on information from IPA (2019) and CAIP (2021). These percentages represent virgin materials. This information is used to determine the market share that the recycled material could replace according to its quality, as seen in Table 2.

Table 1. Argentine legislation on the quality of plastics required for their use in applications.

Application	Requirements	Legislation
Food packaging	The regulations include a positive listing of materials and impose a ban on reusing plastic food containers. However, this prohibition has three exceptions: returnable PET containers for carbonated soft drinks, three-layer PET containers for the same purpose, and single-layer PET containers containing a mix of virgin and recycled material.	Argentine Food Code (CAA) (Chapter IV - Packaging) Article 200 bis - (Joint Resolution N° 32/03 and N° 287/03), Article 212, as well as the MERCOSUR Legislation in force (Resolution GMC (Common Market Group) 56/92). https://alimentosargentinos.magyp.gob.ar/contenido/marco/CAA/Capitulo_04.htm
Pharmaceutical and medical	The accepted additives are indicated for each type of material described in FA8 Chapter 420.	Law N° 16.463. Law N° 2724. File N° 1-47-1110-2283-02-0 of the registry of the National Administration of Medicines, Food and Medical Technology (A.N.M.A.T.). FARMACOPA Argentina Decree 202/2003 https://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/anexos/85000-89999/86181/norma.htm
Household items (within this group, toys are included)	The presence of THREE (3) phthalates (DBP, BBP, and DEHP) is restricted for articles, or parts thereof, of flexible material, and the presence of THREE (3) others (DNOP, DINP, and DIDP) is restricted for articles, or parts thereof, of flexible material that can be put in the mouth by children.	Resolution No. 583/08 of the Ministry of Health establishes the safety requirements for the manufacture, import, export, marketing, or delivery free of charge of childcare articles and toys. https://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/anexos/155000-159999/158549/norma.htm
Electricity and electronics	The producers of EEE shall have the following obligations. To design the appliances, as well as the spare parts for their repair, it shall be prohibited in the EEE placed in the market the presence of polybrominated biphenyls (PBB), polybromodiphenyl ethers (PBDE), and other substances that (PBDE) and other substances determined to be hazardous.	National law 23992-urban waste-technological-environmental impact-waste-specific. Each province establishes its own law, for example, Provincial Law Buenos Aires 14321 https://normas.gba.gob.ar/documentos/Bj7QDiyV.html#:~:text=La%20presente%20Ley%20fomenta%20un,RAEEs%2C%20sus%20componentes%20y%20materiales.
Building	No specific legal requirements	-
Non-food contact packaging	No specific legal requirements	-
Automotive	No specific legal requirements	-
Furniture and decoration	No specific legal requirements	-
Agro	No specific legal requirements	-
Others	No specific legal requirements	-

Table 2. Percentage distribution of market share by type of plastic and application group in Argentina.

Application group	PET	HDPE	PVC	LDPE	PP	PS	EPS
High Quality	57	27	0	36	10	28	19
Food and pharmaceutical packaging	57	27	0	36	10	28	19
Medium Quality	0	16	20	5	26	13	0
Household goods	0	10	8	0	5	0	0
Electronics and electrical	0	6	12	5	21	13	0
Low Quality	43	57	80	59	64	59	81
Construction	0	18	53	0	13	11	60
Non-food packaging	43	20	10	22	9	23	19
Automotive	0	6	6	2	22	5	0
Furniture & Decoration	0	6	4	1	7	1	0
Agro	0	3	3	8	6	0	0
Other	0	4	4	26	7	19	2
Total	100	100	100	100	100	100	100
Recycled	PET	HDPE	PVC	LDPE	PP	PS	EPS
Q= high	1	1	1	1	1	1	1
Q=medium	0,43	0,73	1,00	0,64	0,90	0,72	0,81
Q=low	0,43	0,57	0,80	0,59	0,64	0,59	0,81

polyethylene terephthalate (PET), high-density polyethylene (HDPE), polyvinyl chloride (PVC), low-density polyethylene (LDPE), polypropylene (PP), polystyrene (PS), and expanded polystyrene (EPS).

Currently, there is no recycled plastic of high quality in the world except for PET. This means that although high quality recycled plastic theoretically has $MS(\text{high Q})$ equal to 1, in reality the recovery efficiency (η_{rec}) is 0.

Case Study. Five hypothetical scenarios were developed to explore the CP plastic in Argentina. These scenarios model different proportions of high, medium, and low-quality plastic recovery.

Scenario 1 is the most representative of the current reality in Argentina for PET, LDPE, HDPE, PVC, PP, PS, and EPS. The other four proposed scenarios consider the current proportion of high-quality PET recycling, which remains constant at 5%, and model the proportion of medium and low-quality recycling, assuming ratios of 0:100, 0:100, 25:75, and 75:25 for the remaining plastics. In other words, the effect of changing the

recovery efficiency was evaluated by modeling the proportion of plastics recovered as a function of their quality in the different scenarios. This work takes into account only the influence of the quality of the recovery without considering, for example, whether the full installed capacity of the recycling plants would be used, thus increasing the amount of recycling.

Additionally, two secondary scenarios were simulated by modeling the amount of high-quality recycled PET. In secondary scenario 1, a maximum value of 7% was considered, based on theoretical values according to global literature (World Economic Forum, 2016), while in secondary scenario 2, a minimum value of 0% for high-quality recycling was established. These scenarios are summarized in Table 3.

Table 3. Case study scenarios: percentage distribution by quality of recycled plastics in Argentina.

Scenario	% High Quality	% Medium Quality	% Low Quality
1. LDPE, HDPE, PP, PS, PSE, PVC	0	50	50
1. PET	5	47,5	47,5
1.1. PET max	7	46,5	46,5
1.2. PET min	0	50	50
2. LDPE, HDPE, PP, PS, PSE, PVC	0	0	100
2. PET	5	0	95
2.1. PET max	7	0	93
2.2. PET min	0	0	100
3. LDPE, HDPE, PP, PS, PSE, PVC	0	100	0
3. PET	5	95	0
3.1. PET max	7	93	0
3.2. PET min	0	100	0
4. LDPE, HDPE, PP, PS, PSE, PVC	0	25	75
4. PET	5	24	71
4.1. PET max	7	23,25	69,75
4.2. PET min	0	25	75
5. LDPE, HDPE, PP, PS, PSE, PVC	0	75	25
5. PET	5	71	24
5.1. PET max	7	69,75	23,25
5.2. PET min	0	75	25

polyethylene terephthalate (PET), high-density polyethylene (HDPE), polyvinyl chloride (PVC), low-density polyethylene (LDPE), polypropylene (PP), polystyrene (PS), and expanded polystyrene (EPS).

The choice to model only the quality in CP and not the quantity was made to highlight this crucial aspect, which is often overlooked when measuring recycling or circularity. This approach acknowledges that not all plastics have the same requirements; while higher-quality recycling can open up more markets, for plastics consistently used in low—and medium-quality markets, investing in high-quality recycling might not be justified due to the lack of market demand.

Regarding the current scenario, the integrated solid waste management (ISWM) system in Argentina is regulated by the Law of Minimum Standards for Environmental Protection, Law 25,916, enacted in 2004. This law establishes that municipalities are responsible for the collection, transportation, treatment, and final disposal of municipal solid waste (MSW). There are no systematic bases and statistics on each municipality's management in the country.

The calculated recovery efficiencies were estimated using waste generation and recycling production at the national level. However, to characterize the waste by type of plastic and to generalize the ISWM scheme, data were taken from the CEAMSE. This company provides services to a population of approximately 17,000,000 inhabitants, representing 37.1% of the total population of Argentina, according to the results of INDEC (2023). In other words, the metropolitan area of Buenos Aires (AMBA) is considered a central point of research due to its wide access to information and data, as well as the convergence of different jurisdictions, including the Nation, the Province of Buenos Aires, the Autonomous City of Buenos Aires (CABA) and the municipalities. Its significant population concentration and position as the epicenter of MSW generation in Argentina stand out. The AMBA also has the largest number of waste pickers, formal (cooperatives) and informal (waste picker collectors), and the most significant presence of plastics industries. (Cittadino *et al.* 2020).

Waste collection strategies characterization. Regarding waste collection strategies, according to the official website of the Gobierno de la Ciudad Autónoma De Buenos Aires (n.d), waste collection strategies in CABA can be classified as formal and informal. Within the first group, waste is collected through municipal solid waste containers, macro-generators (companies and industries), and green points. MSW containers are the main formal waste collection points in CABA. These containers are in different parts of the city and are designed to receive recyclable and non-recyclable waste from citizens. The municipality collects waste from the MSW containers using compactor trucks. Recyclable waste is taken to green centers for sorting and treatment, while non-recyclable waste is taken to landfills. Waste from MSW containers has the highest percentage of rejection (30 to 35%) due to poor sorting at the source. For the rest of the strategies, the rejection is in the order of 10 to 20 %.

Macro generators are large waste producers like businesses, industries, and public institutions. These generators are required to contract private companies to collect their waste. These companies that collect waste from macro-generators must comply with the requirements established by the municipality, such as separating waste into recyclable and non-recyclable and delivering recyclable waste to green centers.

The green points are collection centers for recyclable waste located in different parts of the city. Municipal personnel or volunteers staff these points. Neighbors can bring their recyclable waste to the green points for free delivery. The recyclable waste received at the green points is taken to the green centers for sorting and treatment.

In the informal circuit, waste picker collectors were found, people dedicated to waste collection in urban environments. These waste pickers sell the materials collected to companies specializing in recycling, making this activity a significant source of income as a job.

Green Centers are categorized into A, B, C and D levels based on their infrastructure and technology. Type A centers are characterized by their advanced technology, using facilities called material recovery facilities (MRF), semi-automated processes that achieve high productivity.

On the other hand, type B centers have manual sorting belts and balers, and five centers have these characteristics. Both type A and B centers receive a

variety of waste, including waste from containers, macro-generators, waste picker collectors, and green points.

Type C centers do not have sorting belts but do have balers. Type D centers, on the other hand, carry out all their processes manually. These centers are designed to receive better-sorted waste, such as waste from macro-generators, waste picker collect, and green points.

Characterization of waste generation and recycling: Quantities and types. Cittadino *et al.* (2020) estimate that the per capita generation of municipal solid waste in Argentina is 1.03 kg/day, translating to approximately 40,490 to 47,500 tons/day. Of this, 46% is managed by CEAMSE. The authors suggest that when projecting the amount of plastics discarded nationally, it is most prudent to consider a range where plastics represent between 10 and 20%, with an average of 13% by weight of MSW. The composition of MSW fractions in Argentina reveals a diverse distribution of materials, each contributing to the overall waste stream. Among these fractions, organic matter, primarily food waste, constitutes the largest proportion at 44%. Plastics account for 13% of the waste, followed by paper and cardboard at 18%. Glass, metals, and textiles collectively represent smaller shares, with glass comprising 4%, metals 3%, and textiles 4%. Additionally, pruning, gardening, and aggregates contribute 6% to the waste composition, while pathogens and miscellaneous materials comprise 8%.

Regarding the composition of the plastic fraction in Table 4, PEDB is the most prevalent plastic, about 40% of the total characterized. It is used to manufacture various containers, but its main use is in disposable bags. PET is another important component of waste, although its share has fluctuated between 15% and 10% in recent years. This decrease could be related to the adoption of recycling practices and the reintroduction of returnable glass bottles in certain periods. On the other hand, PVC has had a lower presence in waste, possibly due to restrictions on its use in food packaging (Cittadino *et al.* 2020).

In 2021, about 286,000 tons of plastic were recycled in the country from all types of recyclable plastic waste: domestic, agricultural, and industrial, with a growing trend. The installed plastic recycling capacity is estimated to have still an unused capacity of 60% (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022).

The tons of plastic recovered for each type were obtained from IPA (2019). This information was used to calculate the mass percentage of recovery for each type of plastic relative to the total recovered in 2019.

RESULTS AND DISCUSSION

Recovery efficiencies. As described in the methodology section case study, using the data for total plastic recovered in 2021 and the percentage of recovery for each type of plastic in 2019, the projected tons of recycled material by type for 2021 were estimated. With the values in Table 4, the tons of waste for each type of plastic were calculated for 2021, assuming they remained the same as in 2020.

Table 4. Percentage of plastic-type in the plastic fraction of municipal solid waste in Argentina.

Plastic-type	Percentage (%)
PET	15,6
HDPE	12,1
PVC	3,9
LDPE	39,5
PP	17,1
PS	9,9
Otros	1,9

polyethylene terephthalate (PET), high-density polyethylene (HDPE), polyvinyl chloride (PVC), low-density polyethylene (LDPE), polypropylene (PP), polystyrene (PS), and expanded polystyrene (EPS).

Figure 1 shows the recovery efficiencies for each plastic type according to Equation 1 for the year 2021.

Circularity potential for each type of plastic. Using the results of the recovery efficiencies (Figure 1) and the values of MS (Table 2), CP was calculated for each plastic and each grade. The results are shown in Figure 2.

The recovery efficiencies (Figure 1) show relatively low values. The plastics with the highest recovery efficiency are HDPE and LDPE, with 20.96 %, which means that 79.04 % of the material is lost in the cycle. On the other hand, the plastics with the lowest efficiency are PS and EPS, with 3.59 % and 3.60 %, respectively. The values are related to the amount of waste generated, as HDPE and LDPE represent 12.1 % and 39.5 % of the plastic waste generated.

Regarding recycling potential (Figure 2), it is logical that the plastics with the highest recycling efficiencies have the highest CP: HDPE has the highest CP with 13.6 %, followed by LDPE and PP with 12.9 % and 8.8 %, respectively. Once again, PS and EPS have the lowest CP, with only 3 % and 4 %, respectively.

The influence of the quality of the recovered material and the markets suitable for this quality can be observed; for this reason, HDPE has a higher recycling potential than LDPE, although both have the same recovery efficiency.

In the most favorable scenario simulated, scenario 3, where all the recovered material is recycled at medium quality, an improvement in the CP is observed for all plastics except PET and PSE due to the fact that these plastics do not have a significant market in medium quality applications. The plastics that show the greatest increase in CP when the quality of the recycled material is improved are HDPE, with an increase of 1.68 %, and PP, with a 1.49 % increase. This is relevant when it comes to taking measures such as determining which type of green center each material should be treated in or making investments to improve the circularity of the material.

The most unfavorable scenario is the one in which all the recovered material is recycled with low quality, represented in scenario 2.

These results can be complemented by the findings of the study conducted by the Asociación Sustentar (2022), which proposes a recyclability index, defined as the capacity of materials to effectively fulfill the entire recycling chain. A material with high recyclability can be used as raw material to manufacture other containers. This index quantifies, on a scale from 1 to 5, the effective recovery of materials and is mainly based on the commercialization potential of materials in the city's green centers. Its methodology, based on interviews, obtains for each green center and each material a qualitative response to which a numerical value between 1 and 5 is assigned. Where 5 means the material is recovered and commercialized without issues, and 1 means the material is not recovered and sent to final disposal. Materials with high scores are widely commercialized by cooperatives working in green centers. Generally, they have stable buyers and manage to reinsert the waste into the productive circuit without issues. Among the plastic materials with the highest recyclability value in the city (equal to 5) are PET plastic bottles, HDPE plastic containers (also known as blown plastic), plastic bags (LDPE), and film-type wrappers, as long as they are clean and dry. On the other hand, there are other materials with high recyclability but with a slightly lower value of 5 points, among which are white PET, printed bags (such as those for sugar, sliced bread, and napkins), and plastic dairy containers (PS).

Materials with medium recyclability are found, such as the case of caps and labels are baled together with the bottles, and it is the buyer who is responsible for utilizing or not these materials. Another material with medium recyclability but less frequently commercialized is small plastics, smaller than 10 cm. In many centers with sorting belts, they are difficult to grasp.

Materials with low recyclability are multilayer wrappers, plastic wrappers corresponding to the other category (plastic number 7), and/or PP, EPS, plastic sachets, and various types of plastic trays. A lack of buyers was detected for those wrappers composed of other plastics or PP but with some optimism for recovering this material soon. Regarding plastic sachets, the lack of buyers, low prices, and lack of material and space to store were highlighted.

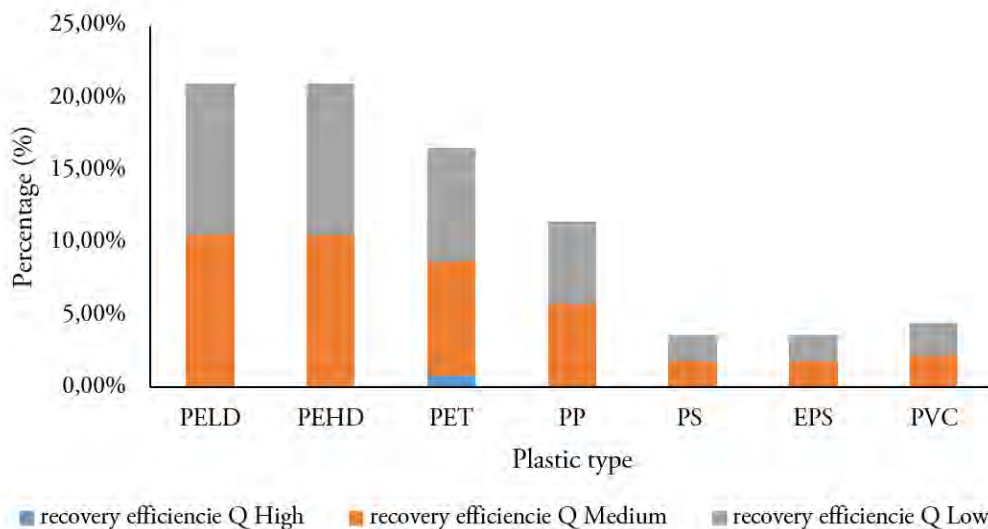


Figure 1. Recovery efficiencies for plastic type in Argentina. polyethylene terephthalate (PET), high-density polyethylene (HDPE), polyvinyl chloride (PVC), low-density polyethylene (LDPE), polypropylene (PP), polystyrene (PS), and expanded polystyrene (EPS).

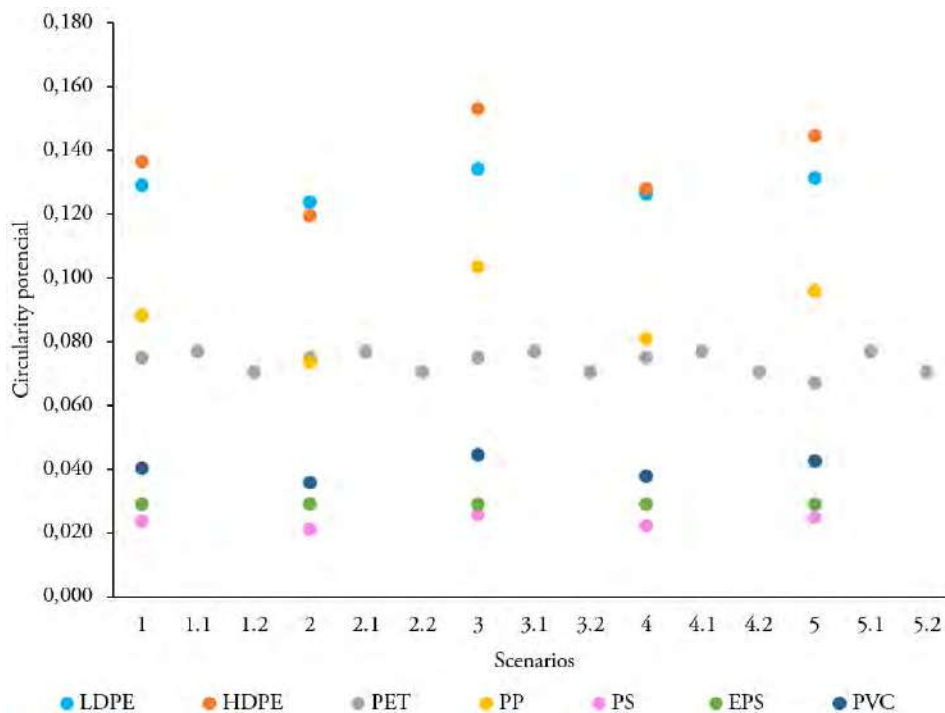


Figure 2. Circularity potential (CP) by plastic types for each scenario. polyethylene terephthalate (PET), high-density polyethylene (HDPE), polyvinyl chloride (PVC), low-density polyethylene (LDPE), polypropylene (PP), polystyrene (PS), and expanded polystyrene (EPS).

PS also proves to be a material with particular difficulties for commercialization. The main reasons are related to technical issues such as lack of densifier or logistics. Due to its low weight and large volume, it is difficult to store for sale not only because of the lack of space but also because of its low price. The only center with a densifier generally receives this material from large generators and also receives material from other centers. To carry out the densification process, around eight people and a lot of materials are required to make it profitable. Plastic trays are also usually not recovered for various reasons, including the lack of buyers, the inability to identify the plastic they are made of, their cleanliness,

their low weight and density, and their low price. Finally, regarding multilayer wrappers, all green centers reported a lack of market for their commercialization.

It can be observed that the high CP rates of HDPE and LDPE align with the results of this study, where the dominant packaging of these materials, such as bags and bottles, show high recyclability in green centers. It can also be observed, for example, that EPS and EP are among the plastics with the most recycling difficulties, and this is reflected both in the recyclability index of the Observatory of Urban Hygiene of The City (Asociación Sustentar, 2022) and

in the CP. However, there is a discrepancy regarding the data obtained for PP, which may be because the products evaluated by the Observatory of Urban Hygiene of The City (Asociación Sustentar, 2022) are mainly general containers. As is shown in Table 2 of plastic MS, the container market for this plastic is low. Therefore, it is possible that its recycling comes from the markets where it is more prevalent. Another curious finding is that PET is a highly recyclable material for green centers and the only plastic with high-quality recycling technology. Yet, it shows a low CP, so specific strategies for this material must be evaluated. Once again, the criticality of market demand for a material and its quality, as well as its ability to transform into raw material again instead of waste, can be observed.

The article by Eriksen *et al.* (2019) aims to analyze waste separation strategies and schemes in Europe and assess their impact on the CP of materials. Due to this different focus, the results are not directly comparable, as the study provides an overall CP for plastics based on each separation scheme.

However, similar conclusions can be drawn between the two studies. For example, it is highlighted that the scenarios that include the recovery of high-quality PET and HDPE have the highest circularity potential. This is because these high-quality plastics can substitute virgin plastics in all possible applications within their respective markets. In contrast, in some applications, medium- and low-quality PET and HDPE can only replace virgin plastic. Since more than half of the PET market relies on high-grade PET for food packaging, the reduction in circularity potential when moving from high to medium or low-grade is particularly significant for PET.

The study by Eriksen *et al.* (2019) also shows that the most efficient plastics recovery system is the one that includes sorting schemes covering both rigid and flexible plastics, with a higher number of target polymer fractions and high source separation efficiency. This system has the potential to close 42% of the material loop, suggesting that with current technology, Europe is still far from achieving a fully closed plastic loop, which would require a theoretical recycling potential of 1.

The results obtained highlight the complexity of achieving effective plastics circularity in the Argentine context. In addition to the need to improve the efficiency of recovery and recycling, it is fundamental to consider the limitation of the quality of recycled plastic as a key obstacle to be addressed to close the material loop fully. Considering both aspects in the circularity allows a more objective and comprehensive approach, allowing to identify the processes that depend on the virgin material and to evaluate the optimal recovery and recycling strategy for each type of plastic.

Regarding the limitations of this methodology, it is important to point out that it is based on market shares, which may vary over time. Although it provides a general assessment of the material, it does not consider aspects related to specific applications that limit the use of recycled plastic. An illustrative example would be the

production of paint containers, which require low quality, where technical limitations of the process may prevent the use of 100 % recycled material in their production. An important limitation of this study is the lack of systematic data collection in Argentina, which introduces inaccuracies in the results. Many data had to be estimated based on the available information and projected to 2021, as more up-to-date data are unavailable. This lack of precise and updated information poses an additional challenge to the accuracy and validity of the results obtained in this analysis. Furthermore, this study could be expanded to thoroughly evaluate various waste separation strategies and their impact on CP.

Obtaining values for substitutability and circularity at the local level is of significant importance in the search for indicators and strategies to address the challenges associated with resource depletion and pollution from the use of plastics. These data are essential in their own right but are also fundamental to making more accurate allocations in LCAs.

Acknowledgments. This work was supported by the doctoral scholarship granted by the National Council for Scientific and Technical Research (CONICET). **Funding:** The authors report there are no funding to declare. **Conflict of interest:** The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper. **Authors' contribution:** María Agustina Zapata: Conceptualization, investigation, formal analysis, and writing original draft; Fernando Arce Bastias: Writing, review, and editing; Bárbara Civit: Writing, supervision, review, and editing; Pablo Arena: supervision, review, and editing.

REFERENCES

- ASOCIACIÓN SUSTENTAR 2022. Índice de reciclabilidad. Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina. Available from Internet in: <https://asociacionsustentar.org/observatorio>
- BIANCO, C.; ISSO F.; MOSKAT, M. 2021 Plásticos en América Latina: breve reseña de su producción, consumo e impactos ambientales. Available from Internet in: <https://www.no-burn.org/es/resources/plasticos-en-america-latina-2021/>
- BRACQUENÉ, E.; LINDEMANN, J.; DUFLOU, J. 2022. Implementation of circularity indicators in a household product manufacturing company. *Procedia CIRP*. 105:660-665. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.02.110>
- CÁMARA ARGENTINA DE LA INDUSTRIA PLÁSTICA-CAIP. 2021 Anuario estadístico de la industria plástica. Actualización 2021. Ciudad Autónoma de Buenos Aires. CAIP.
- CITTADINO, A.; FONTÁN, C.; DE LUCA, M.; ROSSO, M. 2020. Los plásticos en los residuos sólidos urbanos. tipos y cantidades en las estadísticas de CEAMSE. In: Nudelman,

- N.S. Residuos plásticos en Argentina: su impacto ambiental y en el desafío de la economía circular. ANCEFN - Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina. p.127-139.
- CULLEN, J.M. 2017. Circular economy: theoretical benchmark or perpetual motion machine? *Journal of Industrial Ecology*. 21(3):483-486. <https://doi.org/10.1111/jiec.12599>
- ERIKSEN, M.K.; DAMGAARD, A.; BOLDRIEN, A.; ASTRUP, T.F. 2019. Quality assessment and circularity potential of recovery systems for household plastic waste. *Journal of Industrial Ecology*. 23(1):156-168. <https://doi.org/10.1111/jiec.12822>
- GHISELLINI, P.; RIPA, M.; ULGIATI, S. 2018. Exploring environmental and economic costs and benefits of a circular economy approach to the construction and demolition sector. A literature review. *Journal of Cleaner Production*. 178:618-643. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.207>
- GOBIERNO DE LA CIUDAD AUTÓNOMA DE BUENOS AIRES. (n.d.). Buenos Aires. Available from Internet in: <https://buenosaires.gob.ar/>
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y CENSOS - INDEC. 2023. Censo nacional de población, hogares y viviendas 2022: Resultados definitivos: Indicadores demográficos por sexo y edad. INDEC Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina. 98p. Available from Internet in: https://censo.gob.ar/wp-content/uploads/2023/11/censo2022_indicadores_demograficos-1.pdf
- INSTITUTO PETROQUÍMICO ARGENTINO-IPA. 2019. Información estadística de la industria petroquímica y química de Argentina. 39° Edición. IPA. Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina. 135p.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION-ISO. 2006. ISO 14040 Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework. Available from Internet in: <https://www.iso.org/standard/37456.html#:~:text=ISO%2014040%3A2006%20describes%20the,critical%20review%20of%20the%20LCA%2C>
- MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. 2022. Informe del estado del ambiente 2021. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de la Nación. Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina. Available from Internet in: 445p. https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/iea2021_digital.pdf
- SANABRIA GARCIA, E.; HUYSVELD, S.; NHU, T.T.; DE MEESTER, S.; DEWULF, J. 2023. Technical substitutability of recycled materials in life cycle Assessment: A comprehensive review and framework for quantification. *Waste Management*. 171:324-336. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.08.032>
- SCHULTE, A.; SALINAS VELARDE, P.A.; MARBACH, L.; MORBITZ, P. 2023. Measuring the circularity potential of recycled LDPE based on quantity and quality conservation - a functional requirement matrix approach. *Resources, Conservation & Recycling Advances*. 17:200127. <https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2022.200127>
- UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME-UNEP, LAW AND ENVIRONMENT ASSISTANCE PLATFORM--LEAP. (s.f.). Plastics Pollution Toolkit. Available from Internet in: <https://leap.unep.org/en/content/basic-page/plastics-pollution-toolkit-about>
- VADENBO, C.; HELLWEG, S.; FRUERGAAARD ASTRUP, T. 2016 Let's be clear(er) about substitution A reporting framework to account for product displacement in life cycle assessment. *Journal of Industrial Ecology*. 21(5):1078-1089. <https://doi.org/10.1111/jiec.12519>
- WORLD ECONOMIC FORUM 2016. The new plastics economy: Rethinking the future of plastics. 34p. Available from Internet in: https://www3.weforum.org/docs/WEF_The_New_Plastics_Economy.pdf



Perfil de la contaminación por microplásticos en el agua del Embalse Betania, Departamento del Huila, Colombia

Microplastic contamination profile in the water of Betania Reservoir, Huila Department, Colombia

Néstor Alfonso Ramírez-Silva¹ ; Jorge Leonardo Muñoz-Yustres² ; Angela Goretty García-Gómez^{2,3*}

¹Universidad Surcolombiana, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Biología Aplicada. Neiva, Huila - Colombia; e-mail: u20191178249@usco.edu.co

²Universidad Surcolombiana, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Neiva, Huila - Colombia; e-mail: jorge.munoz@usco.edu

³Universidad Surcolombiana, Doctorado en Agroindustria y Desarrollo Agrícola Sostenible. Neiva, Huila - Colombia; e-mail: angela.garcia@usco.edu.co

*autor para correspondencia:

Cómo citar: Ramírez-Silva, N.A.; Muñoz-Yustres, J.L.; García-Gómez, A.G. 2025. Perfil de la contaminación por microplásticos en el agua del Embalse Betania, Departamento del Huila, Colombia. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 28(1):e2593. <http://doi.org/10.31910/rudca.v28.n1.2025.2593>

Artículo de acceso abierto publicado por Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, bajo una Licencia Creative Commons CC BY-NC 4.0

Publicación oficial de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Institución de Educación Superior Acreditada en Alta Calidad por el Ministerio de Educación Nacional

Recibido: marzo 31 de 2024

Aceptado: abril 04 de 2025

Editado por: Helber Adrian Arévalo Maldonado

RESUMEN

La contaminación por plásticos en los ecosistemas acuáticos representa un grave riesgo ambiental, ya que su acumulación en cuerpos de agua afecta a los organismos y puede alterar el equilibrio ecológico. Este estudio investiga la contaminación por microplásticos en el agua del Embalse de Betania, Colombia. Se realizaron muestreos a tres profundidades (superficie, medio y fondo), en 12 estaciones, durante las épocas de aguas bajas y aguas altas, para analizar la abundancia, las características y la distribución vertical y horizontal de los microplásticos. La abundancia en la temporada de aguas bajas fue mayor que en la temporada de aguas altas. Se observó un gradiente decreciente de abundancia de microplásticos hacia zonas más profundas y cercanas a las compuertas del embalse, con una mayor abundancia cerca de áreas más pobladas. Los fragmentos y fibras fueron los más frecuentes, respectivamente, seguidos de películas y las esferas. Este estudio proporciona una línea base para estudiar los patrones de distribución de los microplásticos en el embalse y sus posibles fuentes, lo cual, permitirá realizar investigaciones sobre las interacciones ecológicas de los microplásticos en este ecosistema.

Palabras clave: Contaminantes del agua; Contaminación por basuras; Contaminación por plásticos; Sistema de agua dulce; Impacto ambiental.

ABSTRACT

Plastic pollution in aquatic ecosystems poses a significant environmental threat, as the accumulation of plastics in water bodies affects organisms and can disrupt ecological balance. This study examines microplastic contamination in the waters of the Betania Reservoir in Colombia. Sampling was conducted at three depths (surface, middle, and bottom) across 12 stations during both the low-water season and the high-water season, to analyze the abundance, characteristics, and vertical and horizontal distributions of microplastics. Microplastic abundance was higher during the low-water season compared to the high-water season. A decreasing gradient of microplastic abundance was observed in deeper areas and those closer to the reservoir gates, while higher concentrations were detected near more populated regions. Fragments and fibers were the most common forms, followed by films and beads. This study provides a baseline for understanding the distribution patterns and potential sources of microplastics in the reservoir, enabling research on the ecological interactions of these particles within this ecosystem.

Keywords: Environmental impact; Freshwater system; Litter pollution; Plastic pollution; Water pollutants.

INTRODUCCIÓN

La producción mundial de plásticos aumentó considerablemente en las últimas décadas, alcanzando 400 millones de toneladas anuales, sin indicios de disminuir (Plastics Europe, 2023). La versatilidad, ligereza, durabilidad y bajo costo posicionan a los plásticos como un material común en numerosos productos básicos de uso doméstico e industrial (Rose *et al.* 2023). Los plásticos desempeñan un papel clave en la protección de los alimentos durante el transporte y en el aislamiento de patógenos en el sector de la salud, además de su amplio uso en los textiles y otras industrias (Andrady & Neal, 2009; Idowu *et al.* 2023).

Sin embargo, la inadecuada disposición final de los residuos plásticos genera un problema ambiental global, debido a la acumulación de grandes cantidades en el entorno natural y sus impactos en los ecosistemas (Rose *et al.* 2023; Bhardwaj *et al.* 2024).

Estos residuos se fragmentan en partículas más pequeñas por efectos de procesos físicos, químicos o biológicos, con tamaños macro (1000 - 25 mm), meso (25 - 5 mm), micro (5 mm - 1 μ m) y nano (<1 μ m) (GESAMP, 2019). Los microplásticos (MPs) se clasifican en primarios, como gránulos y pellets, originados directamente por productos industriales y secundarios, como fibras, fragmentos, láminas o espumas, los cuales son el resultado de la fragmentación de plásticos más grandes (Garcés-Ordóñez *et al.* 2022).

Los MPs se propagan en el ambiente por diferentes fuentes y vías, incluyendo la mala gestión de residuos domésticos e industriales, el turismo, la pesca, acuicultura, entre otros (Eerkes-Medrano & Thompson, 2018; Bharath *et al.* 2023; Honorato-Zimmer *et al.* 2024). Los vertimientos de aguas residuales introducen a los ecosistemas acuáticos fibras sintéticas, como el poliéster o fibras naturales, como el algodón, que se desprenden de textiles durante su lavado (Kay *et al.* 2018), ya que las plantas de tratamiento no eliminan estas partículas en su totalidad (Yang *et al.* 2022). Los MPs han llegado a los cuerpos de agua en todo el mundo, incluyendo, ríos, embalses, lagunas, estuarios, mares y océanos, contaminando y generando impactos en la biodiversidad (Garcés-Ordóñez *et al.* 2022; Giarratano *et al.* 2022).

Aunque la contaminación por MPs se ha estudiado con mayor intensidad en ambientes costeros y marinos (Bhardwaj *et al.* 2024; Garcés-Ordóñez *et al.* 2022; Peng *et al.* 2018), en años recientes, se han incrementado los estudios en ecosistemas de agua dulce, especialmente, en ambientes lénticos, como lagos o embalses, ya que estas últimas fragmentan los ríos y acumulan el agua, por lo que se estima que actúa como sumidero temporal o permanente de los MPs (Di & Wang, 2018).

Las abundancias de MPs reportadas dentro de los embalses se asocian a las altas velocidades de flujo del agua en algunas zonas y los vertidos de efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), en el río embalsado (Hübner *et al.* 2020; Vayghan *et al.* 2022). Además, se reportan altas abundancias de MPs en áreas cercanas a los centros poblados (Di & Wang, 2018; Wang *et al.* 2018; Weideman *et al.* 2019; Vayghan *et al.* 2022)

y en zonas con alta intensidad de pesca (Di & Wang, 2018; van Emmerik & Schwarz, 2019).

A nivel vertical, la movilidad de los MPs en la columna del agua depende de su densidad específica, área de superficie y procesos de bioincrustación (Rose *et al.* 2023). Investigaciones recientes destacan la importancia de los tipos de los MPs en su ubicación vertical, los fragmentos y las películas, que son delgados y de forma laminar, poseen mayor área de superficie y tienden a concentrarse en las capas superficiales del agua; en cambio, las fibras y los gránulos, debido a su propensión a la bioincrustación, se suelen sedimentar más rápido, siendo más comunes en zonas profundas y en los sedimentos (Kumar *et al.* 2021; Lin *et al.* 2023).

Por otra parte, la temporalidad es una variable poco explorada en la contaminación por MPs en embalses. Durante las épocas lluviosas, las escorrentías arrastran MPs desde áreas urbanas hacia los cuerpos de agua, aumentando sus concentraciones, mientras que, en épocas secas, los MPs suelen disminuir (Lin *et al.* 2023).

Es de destacar la importancia económica para el departamento del Huila del Embalse de Betania, ya que por su naturaleza multipropósito es un foco de producción pesquera, tanto a nivel nacional como internacional (Carrera-Quintana *et al.* 2022). Por todo lo anterior, este estudio tuvo como objetivo determinar la abundancia, las características y la distribución espaciotemporal de los MPs, en el agua del Embalse de Betania, departamento de Huila, Colombia.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio. El Embalse de Betania se localiza en el valle alto del Río Magdalena, al suroccidente del Departamento del Huila, Colombia, entre las coordenadas N 2°45'29,5", W 75°25'4,1" (Figura 1). Tiene una extensión de 7.400 ha, una profundidad máxima de 90 m y un volumen total de 1.971 millones de m³; siendo un embalse multipropósito para la producción de energía eléctrica y para el desarrollo de la piscicultura (Enel-Emgesa & Fundación Humedales, 2019; Rodríguez, 2021). Se encuentra enmarcado por un régimen climático bimodal, con una temperatura promedio de 28 °C (Escobar, 2005) y una precipitación media anual de 1.680 mm (Enel-Emgesa & Fundación Humedales, 2019).

Recolección de muestras para análisis de MPs. Los muestreos en el embalse se realizaron el 20 de octubre de 2021 (temporada de aguas bajas) y el 19 de marzo del 2022 (temporada de aguas altas). Se tomaron 12 estaciones de muestreo en el embalse, a tres diferentes niveles de profundidad, agua superficial (0-30 cm), 5 m y 10 m, con tres réplicas por cada nivel, exceptuando el punto 1 y 2, en los cuales, se tomaron muestras de agua superficial y a 5 m, debido a que la profundidad en esta zona no alcanzaba los 10 m, dando un total de 102 muestras colectadas por temporada.

Las estaciones de muestreo fueron seleccionadas de forma estratégica, considerando factores que podrían influir en la abundancia de los MPs (Tabla 1).

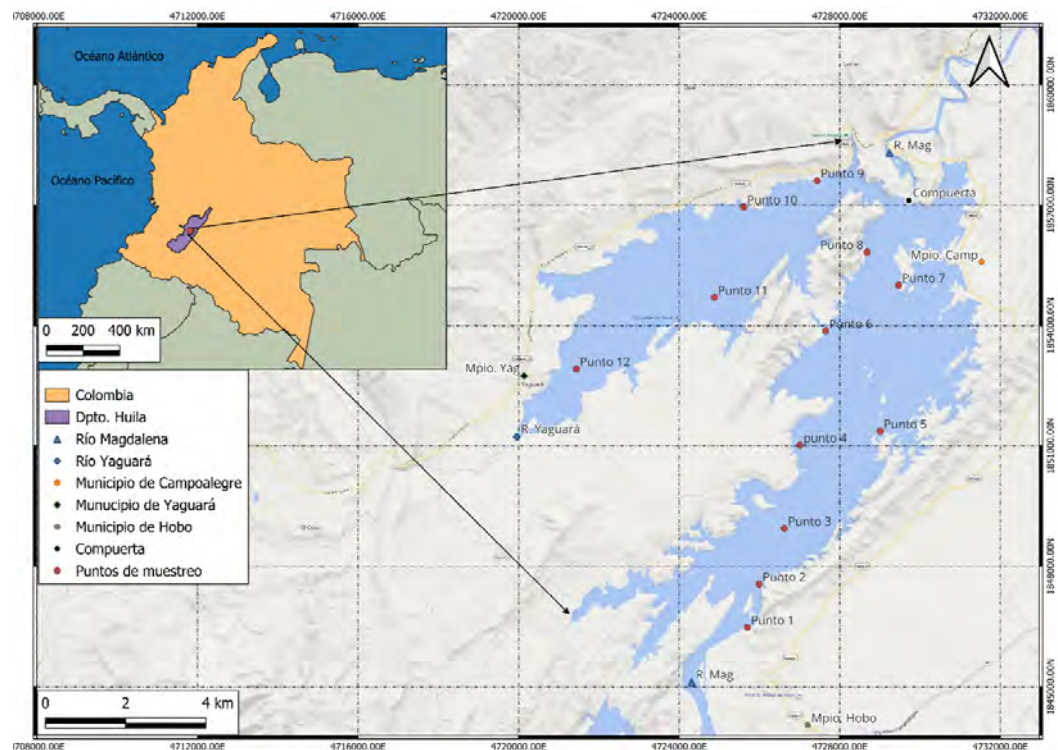


Figura 1. Área de estudio con estaciones y zonas de muestreo, para determinar el perfil de la contaminación por microplásticos en el agua del Embalse Betania, Huila, Colombia.

Tabla 1. Características de la zona de muestreo en el área de estudio.

Puntos de muestreo	Latitud	Longitud	Características por punto
Punto 1	2° 36' 29" N	75° 28' 4" W	Zona de entrada del Río Magdalena y puerto fluvial del Municipio de Hobo
Punto 2	2° 37' 4" N	75° 27' 55" W	Zona de influencia del Río Magdalena, remanso
Punto 3	2° 37' 50" N	75° 27' 34" W	Zona de influencia del Río Magdalena
Punto 4	2° 38' 57" N	75° 27' 22" W	Zona piscícola
Punto 5	2° 39' 9" N	75° 26' 17" W	Zona piscícola
Punto 6	2° 40' 30" N	75° 27' 2" W	Zona piscícola. Remanso
Punto 7	2° 41' 7" N	75° 26' 3" W	Zona piscícola
Punto 8	2° 41' 34" N	75° 26' 28" W	Área turística (Cueva del amor), zona de aguas quietas
Punto 9	2° 42' 32" N	75° 27' 9" W	Zona de condominios río Yaguará
Punto 10	2° 42' 10" N	75° 28' 8" W	Zona de influencia turística (cabañas, actividades acuáticas) río Yaguará
Punto 11	2° 40' 57" N	75° 28' 31" W	Zona de influencia agrícola
Punto 12	2° 39' 58" N	75° 30' 23" W	Desembocadura río Yaguará, puerto fluvial y centro poblado de Yaguará

El muestreo de agua superficial se realizó utilizando una red de fitoplancton con poro de 90 μm , en recorridos circulares, por un periodo de 10 min a un nudo, filtrando un total de 21m³. En aguas medias (5m) y profundas (10m), se tomaron muestras puntuales con una botella Van Dorn, con una capacidad de 5 L por triplicado que, posteriormente, fueron llevadas a la red de fitoplancton, para un total de 15 L filtrados; luego, fueron depositadas en frascos de vidrio de 200 mL con tapa metálica, previamente rotulados (Tavşanoğlu *et al.* 2020), para ser transportadas y procesadas en el laboratorio de química de la Universidad Surcolombiana.

Procesamiento de las muestras en el laboratorio. Una vez las muestras se almacenaron en el laboratorio, se retiraron los restos de basura no plástica (hojas, madera) de gran tamaño, con la ayuda de una pinza metálica, para su posterior proceso de digestión. Para eliminar la materia orgánica de la muestra, se añadió peróxido de hidrógeno (H₂O₂) al 30 % (200 mL) a 200 mL de la muestra (relación 1:1) en un matraz Erlenmeyer y se incubó durante dos días a 60 °C. Finalizado el proceso de digestión, se realizó una separación por densidades, para favorecer la sedimentación de partículas y reducir la turbidez, agregando 30 g de NaCl por cada 100 mL de muestra, con el fin de incrementar la densidad del medio y promover la floculación de sólidos. Posteriormente, la mezcla se agitó en una plancha magnética, a 20 °C, hasta la disolución completa de la sal y se dejó reposar durante 24 horas.

El sobrenadante se pasó a través de un filtro de membrana MFTM SMWP04700 de 5 μm de poro y 47 mm de diámetro, usando una bomba de vacío y un embudo bushner de porcelana, siendo depositados en cajas Petri de vidrio, para su posterior análisis, por medio de microscopio óptico (Shruti *et al.* 2019).

Observación e identificación de MPs. Para la identificación y la cuantificación de las micropartículas plásticas, según su morfología, fibras, esferas, fragmentos y láminas y color, cada filtro se inspeccionó con un microscopio óptico (Leica DM500), con objetivos de 10 y 40 X, identificando aquellas partículas de color uniforme, con forma irregular, bordes afilados y angulares, láminas planas y delgadas, partículas esféricas circulares u ovoides, fibras simétricas y no ramificadas y de gran longitud, sin tejido orgánico visible (Zhou *et al.* 2020).

Calidad y control. Las muestras se analizaron en un ambiente aislado y el personal usaba prendas de vestir de algodón, para evitar la contaminación cruzada; adicionalmente, el peróxido de hidrógeno fue filtrado con filtros de microfibras de vidrio Whatman GF6, para su posterior uso con las muestras colectadas. Por cada punto de muestreo se corrió una muestra en blanco, en los cuales, no se registraron los MPs.

Análisis de datos. Para evaluar la interacción entre los puntos de muestreo, la temporada y la abundancia de MPs, se realizó un análisis ANOVA de dos vías, considerando los supuestos de normalidad, homocedasticidad e independencia, siendo valores estadísticamente significativos $p < 0,05$.

Adicionalmente, se aplicó un análisis de conglomerados K-means con el objetivo de agrupar los puntos de muestreo de MPs, según las

características morfológicas y de abundancia de cada uno de estos, empleando el software RStudio.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Abundancia y distribución espacio temporal de MPs

Horizontal. Se encontraron MPs en todas las muestras analizadas, tanto vertical como horizontalmente, siendo mayor la abundancia promedio de MPs en el agua en la temporada de aguas bajas ($49,6 \pm 22,8$ elementos/L), en comparación con la temporada de aguas altas ($31,6 \pm 14,2$ elementos/L). Asimismo, las concentraciones por temporada revelan que la mayor abundancia promedio de MPs se encontró en el punto 12 en las dos temporadas, con $102,8 \pm 21,8$ elementos/L, en aguas bajas y $53,9 \pm 12,3$ elementos/L, en aguas altas, el segundo punto con mayor abundancia fue el punto 10, con $65,6 \pm 12,5$ elementos/L, en aguas bajas, lo cual, difiere de la temporada de aguas altas, en donde el segundo punto con mayor abundancia fue el punto 8, con $48,3 \pm 16,1$ elementos/L. Los puntos que presentaron menor abundancia de MPs fueron el 6, en aguas bajas, con $26,1 \pm 2,5$ elementos/L y el punto 9, en aguas altas, con $18,9 \pm 3,5$ elementos/L (Figura 2).

El análisis de varianza de dos vías ANOVA, para evaluar el efecto de la temporada y los puntos de muestreo con relación a la abundancia de MPs, revelaron que existe un efecto significativo en la temporada en la concentración de MPs ($F(1, 48) = 43,04, p < 3,47 \times 10^{-8}$). Adicionalmente, se encontraron valores significativos ($F(11, 48) = 10,50, p < 1,908 \times 10^{-9}$) entre los 12 puntos de muestreo, señalando cambios, según la ubicación, e interacción entre la temporada y los puntos de muestreo ($F(11, 48) = 2,14, p = 0,04$), indicando que la temporada tiene efecto sobre la abundancia de MPs, según el punto de muestreo.

Las abundancias de MPs encontradas en este estudio son mayores a las reportadas por Rojas-Luna *et al.* (2023), en la Laguna de Luruaco, ubicada en la Cuenca Baja del Río Magdalena, Colombia, las cuales, reportaron un rango de abundancia general entre 0,6 a 3,8 elementos/L, mayor en temporada lluviosa que seca (1,9 elementos/L vs 0,2 elementos/L); también, superan las abundancias reportadas en los embalses de Las Tres Gargantas (4,7 elementos/L) (Di & Wang, 2018) y Danjiangkou (7,2 elementos/L) (Lin *et al.* 2021), en China; sin embargo, son menores a las reportadas por Zhang *et al.* (2022), en los ríos urbanos de la ciudad de Chengdu, en China, donde reportaron valores de 762,95 elementos/L, en los sitios con mayor concentración de MPs.

El registró de mayor abundancia de MPs, en la época de aguas bajas o seca, concuerda con los hallazgos de Han *et al.* (2020), en el tramo inferior del río Amarillo, cerca de su desembocadura, en China y por Wang *et al.* (2021), en la cuenca del río Manas, en la región Xinjiang China, los cuales, reportaron valores de 930 elementos/L y 17 elementos/L, respectivamente, donde los autores plantean que podría estar relacionado con la evaporación del agua en la época seca, lo que puede favorecer el aumento de la concentración de MPs en el agua represada (Wang *et al.* 2021).

Adicionalmente, para el caso de Betania, esta temporada también se caracteriza por el alto flujo de turistas que se alojan en los condominios en laderas del embalse y realizan diversas actividades acuáticas. Esta alta afluencia de personas puede generar un aumento en el número de residuos plásticos, como botellas, empaques, entre otros (Girão, 2022).

Vertical. De forma general, en las tres profundidades, se encontró que la mayor abundancia se presentaba en la zona media (5m), con $48,3 \pm 25,4$ elementos/L, seguido por la superficial (0-1m), con $42,2 \pm 12,8$ elementos/L y la zona profunda (10m), con $30,9 \pm 15,3$ elementos/L. De la misma manera, para las dos temporadas, con $49,9 \pm 16,3$ elementos/L aguas bajas vs $34,4 \pm 17,3$ elementos/L aguas altas y en todas las profundidades, 5m ($59,7 \pm 38,3$ elementos/L aguas bajas vs $36,9 \pm 15,2$ elementos/L aguas altas) y 10m ($41,2 \pm 23,4$ elementos/L aguas bajas vs $20,7 \pm 9$ elementos/L aguas altas).

En cuanto a los puntos de muestreo, la mayor abundancia en agua superficial se encontró en el punto 8, con $70,8 \pm 28,5$ elementos/L y a profundidades de 5 y 10 m, la mayor abundancia, se encontró en el punto 12, con $113,3 \pm 67,4$ elementos/L aguas bajas y $70 \pm 47,1$ elementos/L aguas altas. Se registró la misma tendencia para la temporada de aguas bajas y altas, siendo el punto 8 con la mayor abundancia en agua superficial, con $73,3 \pm 12,6$ elementos/L aguas bajas vs $68,3 \pm 4,1$ elementos/L aguas y el punto 12 en las profundidades de 5 m, con $161,7 \pm 64,5$ elementos/L aguas bajas vs $65 \pm 13,2$ elementos/L aguas altas y 10 m, con $103,3 \pm 33,3$ elementos/L aguas bajas vs elementos/L aguas altas.

Esta mayor abundancia de MPs en aguas medias concuerdan con lo reportado por Lin *et al.* (2021), en el Embalse de Danjiangkou, en China, donde los autores concluyen que la acumulación en la capa intermedia se debe a la estabilidad relativa del flujo en esta zona, lo cual, favorece la retención de partículas, en contraste con la mayor velocidad de las aguas superficiales, lo que reduce el tiempo de residencia de los microplásticos en la superficie y favorece su acumulación en la capa intermedia (Lin *et al.* 2021).

De igual manera, la distribución de los MPs en la columna de agua se asocia con las propiedades del tipo de polímero. Según estudios realizados por Lenaker *et al.* (2019), a mayor profundidad aumenta la abundancia de MPs de alta densidad, como el polipropileno (PP) y el polietileno (PE) y en el área superficial abundan aquellos con menor densidad, como el polietileno tereftalato (PET) (Yang *et al.* 2022).

Características morfológicas de MPs. La caracterización morfológica de MPs muestra que, en promedio, los fragmentos fueron las formas más abundantes, con $29,7 \pm 15,7$ elementos/L, seguido por las fibras, con $8,6 \pm 4$ elementos/L y, en menor proporción, las películas, con $0,9$ elementos/L y las esferas, con $0,8$ elementos/L. Este mismo patrón se observa en cada temporada, siendo las aguas bajas en donde se encuentra la mayor concentración de fragmentos, con $39,6 \pm 25,6$ elementos/L y fibras, con $9,6 \pm 6,5$ elementos/L, en comparación con la temporada de aguas altas con fragmentos, con $19,8 \pm 9,1$ elementos/L y fibras, con $7,6 \pm 3,9$ elementos/L (Figura 3).

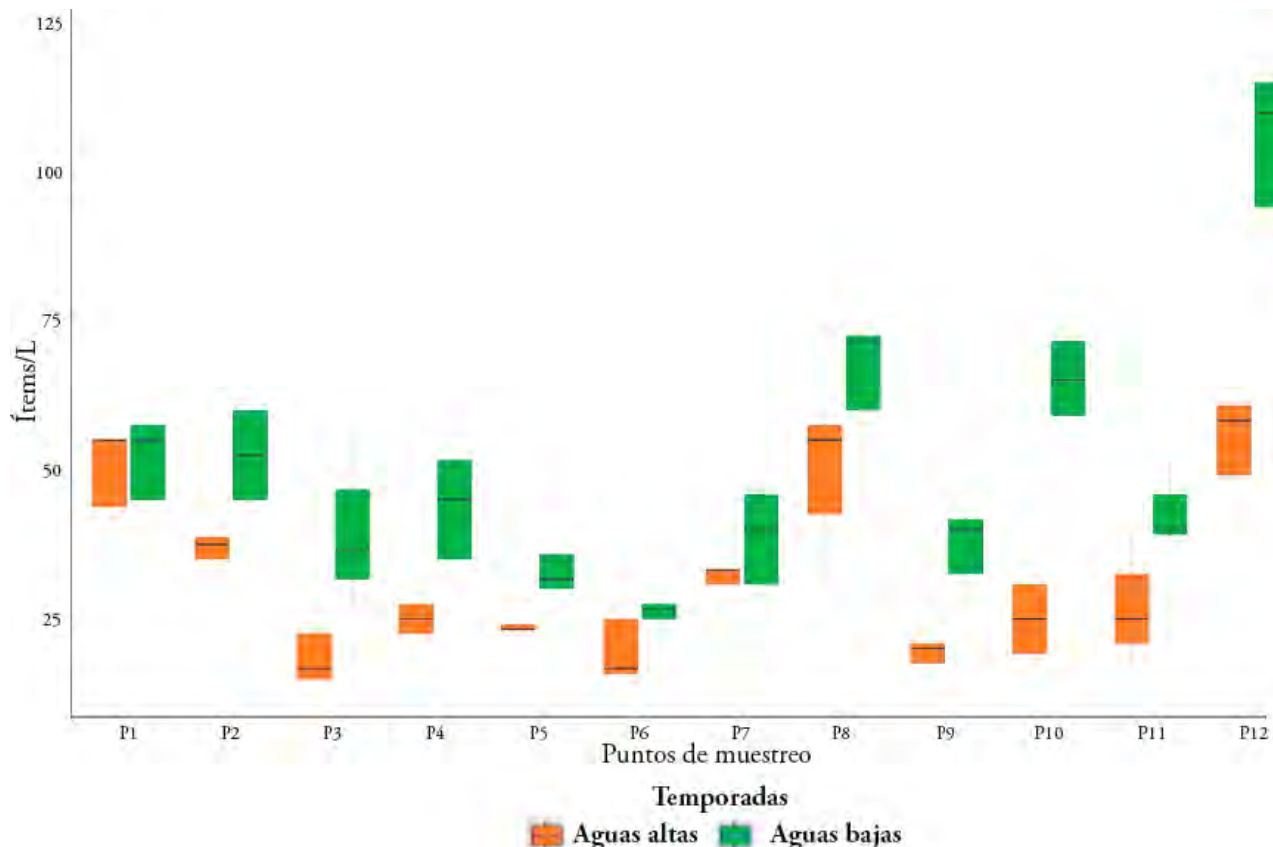


Figura 2. Abundancia de microplásticos en los puntos muestreados para las temporadas de aguas altas (lluvias) y aguas bajas (sequía) en el Embalse Betania, Huila, Colombia.

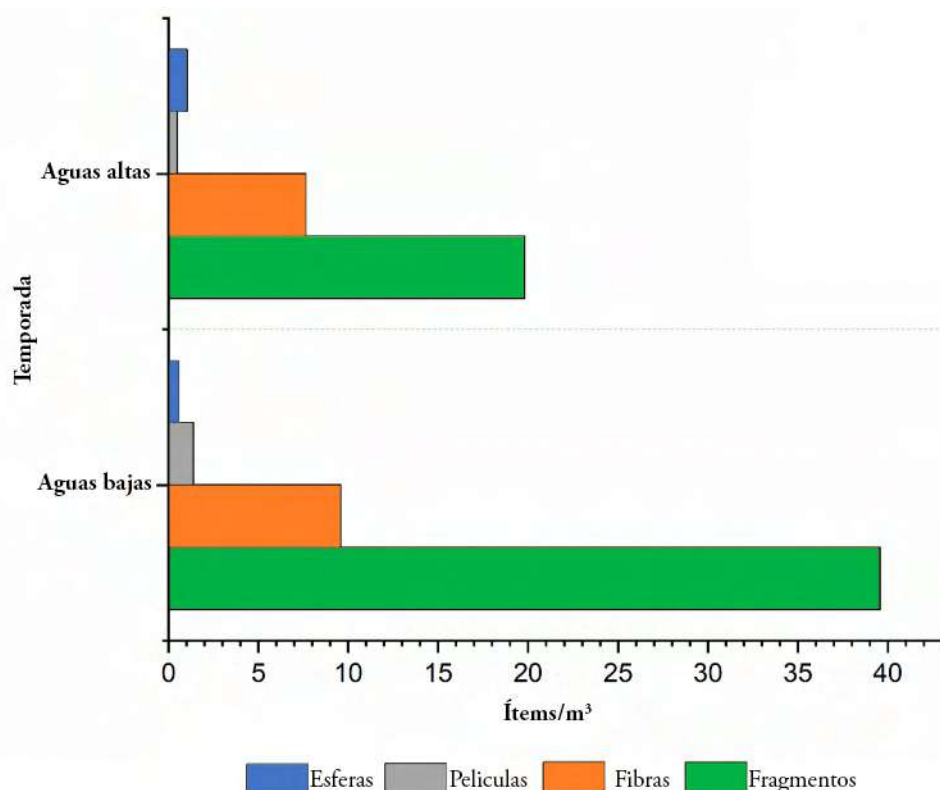


Figura 3. Características morfológicas de los MPs para las dos temporadas muestreadas en el Embalse Betania, Huila, Colombia.

La relación entre la morfología de los MPs y los niveles de profundidad del embalse revela una mayor concentración en los diferentes tipos en aguas medias (5m); sin embargo, las películas mostraron un patrón diferente, con mayor abundancia a 10 m de profundidad. Aunque diversos estudios, como los de van Emmerik & Schwarz (2019), sugieren que las películas, por su forma delgada y superficie, tienden a flotar; aquellas que cuentan con superficies corrugadas facilitan el establecimiento de colonias microbianas (Watkins *et al.* 2019), por lo tanto, permitiría el asentamiento de estas partículas y explicaría su mayor concentración a bajas profundidades.

Por otro lado, los fragmentos en mayor proporción es similar a lo reportado por Wu *et al.* (2020), con un 81,9 % de fragmentos, atribuibles a envases que contienen bebidas que, en conjunto con las altas densidades de personas, pueden aumentar la presencia de estos en los cuerpos de agua; es así, que la represa de Betania, al ser un sitio turístico importante, se podría inferir que el consumo de diferentes alimentos con empaques plásticos, tanto alrededor del cuerpo de agua como dentro de éste, podrían aumentar las concentraciones de fragmentos en ambas temporadas del año. A su vez, las fibras al ser el segundo morfotipo más encontrado en ambas temporadas, estarían asociadas a la degradación de redes de pesca y cuerdas, así como de las aguas provenientes del lavado de ropa (Di & Wang, 2018; Vayghan *et al.* 2022), mientras que las películas se pueden asociar a empaques flexibles, envolturas plásticas, bolsas de plástico y recubrimientos agrícolas (Wu *et al.* 2020).

Características por color de MPs. De forma general, se identificó que, en promedio, las partículas de color rojo fueron las más abundantes, con

22,6 elementos/L, seguidas por las de color azul, con 9 elementos/L; este patrón también se observa en cada temporada, tanto en aguas bajas, con 32,5 elementos/L de color rojo vs 9,9 elementos/L de color azul, como en aguas altas 12,8 elementos/L de color rojo vs 9 elementos/L de color azul (Figura 4).

Estos resultados de forma y color se asociaron a fuentes de contaminación de MPs secundarios y el color predeterminado con el que eran fabricados.

Se realizó un análisis de PCA para reducir las dimensiones, en el cual, se tomaron los primeros componentes, que explican el 63,9 %, con los resultados obtenidos se realizó un análisis cluster K-means, para agrupar los puntos de muestreo de MPs, según su abundancia, forma y color; este análisis de conglomerados muestra 3 dimensiones (Dim1=30 %, Dim2= 19,2 % y DIM3=14,7 %). El método “silhouette” determina que la distribución óptima debe ser en cuatro grupos diferentes, donde cada uno sugiere posibles fuentes de MPs (Figura 5).

La asociación presenta cuatro grupos diferentes, en donde, el punto 12 presentan las mayores concentraciones de MPs debido, posiblemente, a la cercanía al centro poblado, el puerto y el ingreso del río Yaguará al embalse, sugiriendo que estas son las principales fuentes de MPs que influyen en su alta abundancia, lo cual, también fue registrado en otros estudios, como el de Weideman *et al.* (2019), en el sistema de los ríos Orange-Vaal en Sudáfrica.

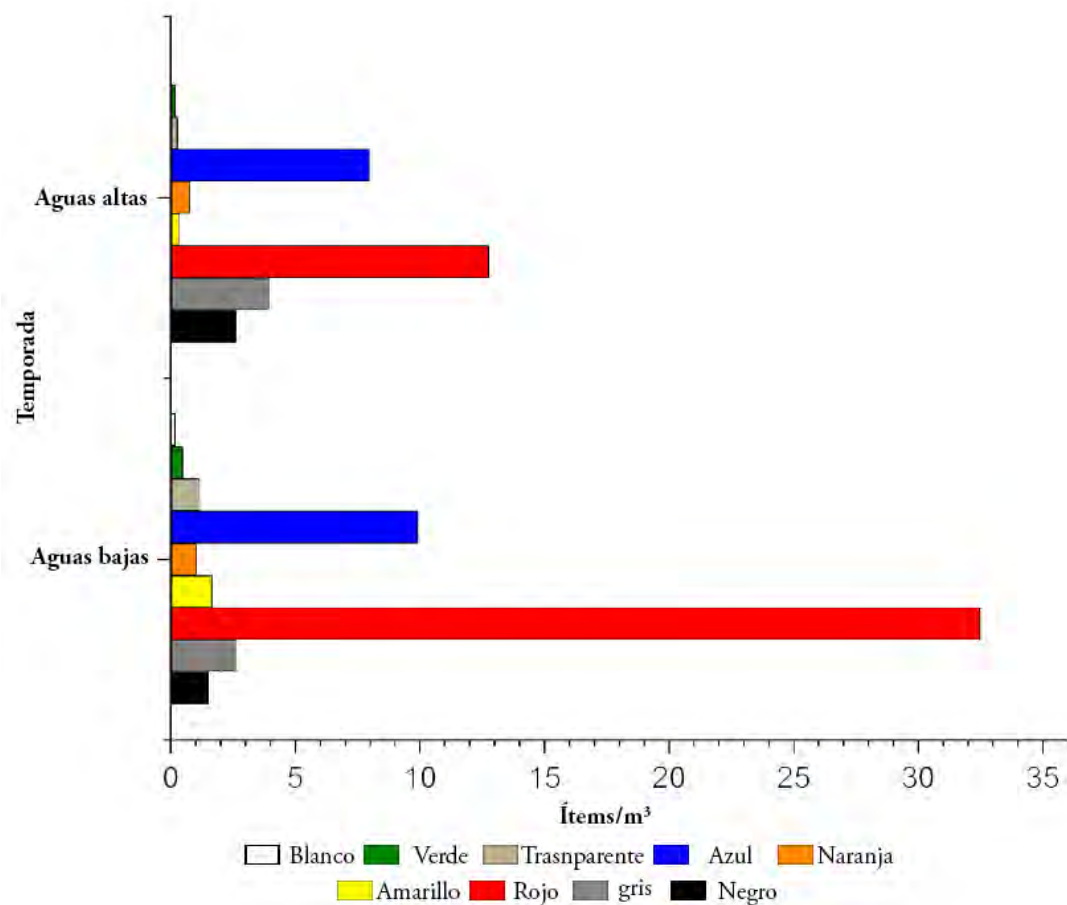


Figura 4. Distribución de color de los MPs para las dos temporadas muestreadas en el Embalse Betania, Huila, Colombia.

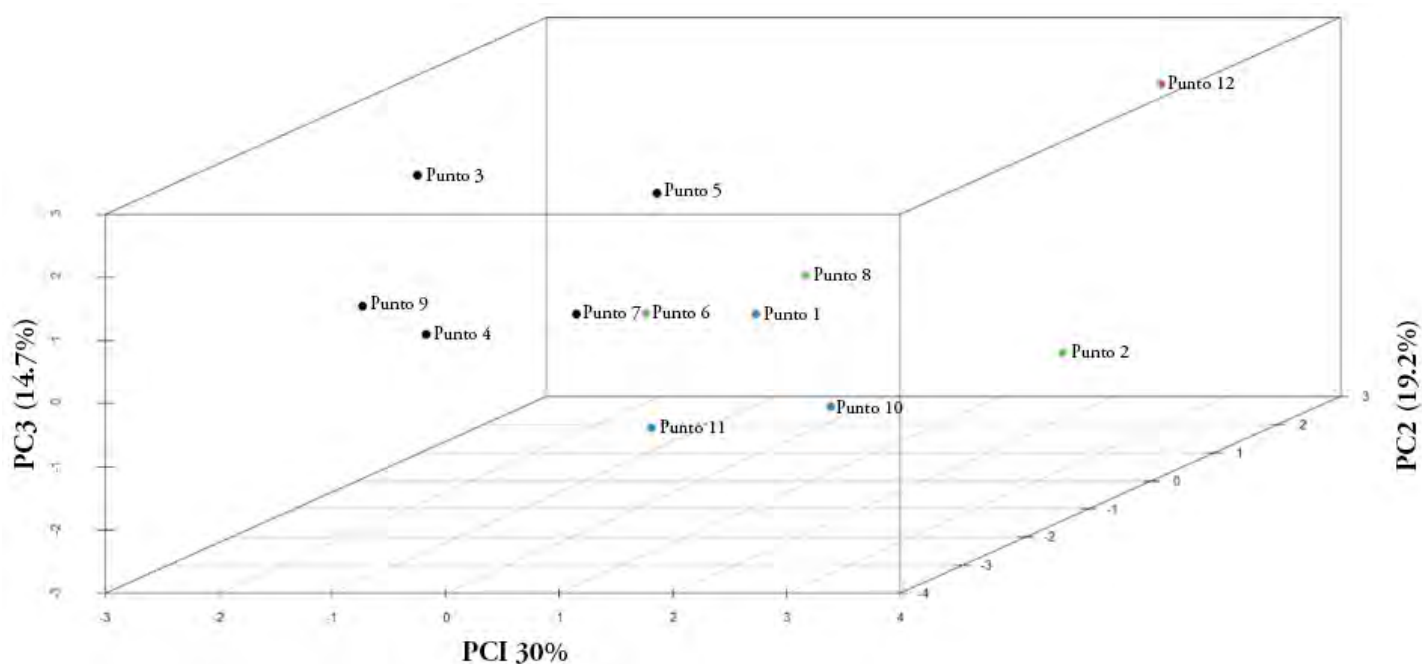


Figura 5. Análisis cluster k-means, donde se observan cuatro grupos diferentes, para los MPs, discriminados por color, en el Embalse Betania, Huila, Colombia.

Otro subgrupo es el formado por los puntos 3,4,5,7 y 9, el cual, también se ve influenciado por actividades domésticas, turísticas y piscícolas (Tabla 1) y que podrían ser fuentes potenciales de MPs, pero que sus aportes no modifican el patrón de distribución, ya que se presenta mayores concentraciones en las entradas del embalse para el Río Magdalena, como Yaguará, siendo, probablemente, los ríos, los principales aportes de contaminación, y otros de menor aporte, como las actividades de pesca y piscicultura, dentro del embalse.

El transporte de MPs de aguas que siguen la corriente hacia la compuerta principal del embalse, también se puede considerar una fuente de MPs por escorrentía (Liu *et al.* 2022), como se puede apreciar en el tercer grupo, compuesto por los puntos 1 entrada del Río Magdalena, y los puntos 10 y 11, que sigue la corriente del río Yaguará. Además, la descarga de agua proveniente de la hidroeléctrica El Quimbo puede influir en el punto 1, ya que en la apertura de sus compuertas puede facilitar que las corrientes lleven las partículas hacia la represa de Betania, aumentando las concentraciones en la superficie de los muestreos realizados (Watkins *et al.* 2019); sin embargo, se evidencia que las abundancias de MPs disminuyen a medida que se llega a la zona de las compuertas; esto se debe a que la distribución horizontal de los MPs está relacionada con la dirección de flujo del cuerpo de agua (Fan *et al.* 2022), la cual, tiende a ser menor cerca de las compuertas, lo que favorece el movimiento vertical frente al movimiento horizontal (Song *et al.* 2020).

El último grupo conformado por los puntos 2, 6 y 8, se evidencia en zonas de aguas quietas, como en el punto 8, dado que, posiblemente, las formaciones rocosas que la rodean impiden que exista una corriente con el mismo sentido que en el resto del embalse. Por otro lado, los puntos 2 y 6, también corresponde a zonas de remansos, donde la corriente no es muy fuerte. En estudios previos, se ha observado que las zonas con menor velocidad de flujo pueden favorecer la acumulación de microplásticos en los sedimentos, debido a la reducción de la turbulencia y la deposición de partículas plásticas en el fondo (Wu *et al.* 2020); no obstante, se deben considerar y estudiar las condiciones propias de la represa, pues al tener una particular forma de herradura, la influencia de los dos afluentes que la alimentan y las operaciones relacionadas a la producción de energía, se podrían generar patrones de flujo irregulares, que dificultan las modelaciones hidrológicas, precisas para entender el comportamiento de los microplásticos, en estas condiciones específicas.

Este estudio proporciona una línea base para estudiar los patrones de distribución de los microplásticos en el embalse y sus posibles fuentes, lo cual, permitirá, a futuro, investigaciones sobre las interacciones ecológicas de los MPs en este ecosistema.

Agradecimientos

A la Facultad de Ciencias Exactas por la disponibilidad y préstamo de los laboratorios, lo que permitió la realización de los experimentos y análisis correspondientes. Financiación: Este trabajo fue financiado

por la Universidad Surcolombiana, a través de la Vicerrectoría de Investigación, cuyo apoyo fue fundamental para el desarrollo del proyecto. Conflicto de intereses: Los autores declaran que no existen conflictos de intereses financieros o personales que pudieran haber influido en los resultados presentados en este estudio.

REFERENCIAS

- ANDRADY, A.L.; NEAL, M.A. 2009. Applications and societal benefits of plastics. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. 364(1526):1977-1984. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0304>
- BHARATH, K.M.; MUTHULAKSHMI, A.L.; NATESAN, U. 2023. Microplastic Contamination around the Landfills: Distribution, Characterization and Threats: A Review. *Current Opinion in Environmental Science & Health*. 31:100422. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2022.100422>
- BHARDWAJ, L.K.; RATH, P.; YADAV, P.; GUPTA, U. 2024. Microplastic contamination, an emerging threat to the freshwater environment: a systematic review. *Environmental Systems Research*. 13(1):8. <https://doi.org/10.1186/s40068-024-00338-7>
- CARRERA-QUINTANA, S.C.; GENTILE, P.; GIRÓN-HERNÁNDEZ, J. 2022. An overview on the aquaculture development in Colombia: Current status, opportunities and challenges. *Aquaculture*. 561:738583. <https://doi.org/10.1016/J.AQUACULTURE.2022.738583>
- DI, M.; WANG, J. 2018. Microplastics in surface waters and sediments of the Three Gorges Reservoir, China. *Science of the Total Environment*. 616-617:1620-1627. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.150>
- EERKES-MEDRANO, D.; THOMPSON, R. 2018. Chapter 4 - Occurrence, fate, and effect of microplastics in freshwater systems. En: Zeng, E.Y. *Microplastic contamination in aquatic environments: An emerging matter of environmental urgency*. Elsevier. p.95-132. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813747-5.00004-7>
- ENEL-EMGESA; FUNDACIÓN HUMEDALES. 2019. Ecosistemas y territorios de Betania, programa de educación ambiental central hidroeléctrica Betania. 55p. Disponible desde Internet en: <https://fundacionhumedales.org/wp-content/uploads/2021/03/Ecosistemas-y-Territorios-de-Betania.pdf>
- ESCOBAR, M. 2005. Plan de ordenamiento de la pesca y la acuicultura en el Embalse de Betania. Instituto Colombiano de Desarrollo Rural - INCODER. Bogotá. 79p.

- FAN, J.; ZOU, L.; DUAN, T.; QIN, L.; QI, Z.; SUN, J. 2022. Occurrence and distribution of microplastics in surface water and sediments in China's inland water systems: A critical review. *Journal of Cleaner Production*. 331:129968. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129968>
- GARCÉS-ORDÓÑEZ, O.; SALDARRIAGA-VÉLEZ, J.F.; ESPINOSA-DÍAZ, L.F.; PATIÑO, A.D.; CUSBA, J.; CANALS, M.; MEJÍA-ESQUIVIA, K.; FRAGOZO-VELÁSQUEZ, L.; SÁENZ-ARIAS, S.; CÓRDOBA-MEZA, T.; THIEL, M. 2022. Microplastic pollution in water, sediments and commercial fish species from Ciénaga Grande de Santa Marta lagoon complex, Colombian Caribbean. *Science of The Total Environment*. 829:154643. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154643>
- GIARRATANO, E.; DI MAURO, R.; SILVA, L.I.; TOMBA, J.P.; HERNÁNDEZ-MORESINO, R.D. 2022. The Chubut River Estuary as a Source of Microplastics and Other Anthropogenic Particles into the Southwestern Atlantic Ocean. *Marine Pollution Bulletin*. 185, Part A:114267. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.114267>
- GIRÃO, A.V. 2022. SEM/EDS and optical microscopy analysis of microplastics. En: Rocha-Santos, T.; Costa, M.F.; Mouneyrac, C. (eds). *Handbook of microplastics in the environment*. Ed. Springer. p.57-78. https://doi.org/10.1007/978-3-030-39041-9_7
- HAN, M.; NIU, X.; TANG, M.; ZHANG, B.T.; WANG, G.; YUE, W.; KONG, X.; ZHU, J. 2020. Distribution of microplastics in surface water of the lower Yellow River near estuary. *Science of the Total Environment*. 707:135601. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135601>
- HONORATO-ZIMMER, D.; ESCOBAR-SÁNCHEZ, G.; DEAKIN, K.; DE VEER, D.; GALLOWAY, T.; GUEVARA-TORREJÓN, V.; HOWARD, J.; JONES, J.; LEWIS, C.; RIBEIRO, F.; SAVAGE, G.; THIEL, M. 2024. Macrolitter and microplastics along the East Pacific coasts - A homemade problem needing local solutions. *Marine Pollution Bulletin*. 203:116440. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.116440>
- HÜBNER, M.K.; MICHLER-KOZMA, D.N.; GABEL, F. 2020. Microplastic concentrations at the water surface are reduced by decreasing flow velocities caused by a reservoir. *Fundamental and Applied Limnology*. 194(1):49-56. <https://doi.org/10.1127/fal/2020/1307>
- IDOWU, G.A.; OLALEMI, A.O.; AIYESANMI, A.F. 2023. Environmental Impacts of Covid-19 Pandemic: Release of Microplastics, Organic Contaminants and Trace Metals from Face Masks under Ambient Environmental Conditions. *Environmental Research*. 217:114956. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114956>
- JOINT GROUP OF EXPERTS ON THE SCIENTIFIC ASPECTS OF MARINE ENVIRONMENTAL PROTECTION, GESAMP. 2019. Guidelines for the monitoring and assessment of plastic litter and microplastics in the ocean. En: Kershaw, P.J.; Turra, A.; Galgani, F. (Eds.). IMO/FAO/ UNESCO IOC/UNIDO/WMO/IAEA/UN/ UNEP/UNDP/ISA Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection. Reports and Studies GESAMP 99. p.130. Disponible desde Internet en: <http://www.gesamp.org/publications/guidelines-for-the-monitoring-and-assessment-of-plastic-litter-in-the-ocean>
- KAY, P.; HISCOE, R.; MOBERLEY, I.; BAJIC, L.; MCKENNA, N. 2018. Wastewater treatment plants as a source of microplastics in river catchments. *Environmental Science and Pollution Research*. 25:20264-20267. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2070-7>
- KUMAR, R.; SHARMA, P.; VERMA, A.; KUMAR, P.; SINGH, P.; KUMAR, P.; CHANDRA, R.; VARA, P. V. 2021. Effect of Physical Characteristics and Hydrodynamic Conditions on Transport and Deposition of Microplastics in Riverine Ecosystem. *Water*. 13(19):2710. <https://doi.org/10.3390/w13192710>
- LENAKER, P.L.; BALDWIN, A.K.; CORSI, S.R.; MASON, S.A.; RENEAU, P.C.; SCOTT, J.W. 2019. Vertical distribution of microplastics in the water column and surficial sediment from the Milwaukee River Basin to Lake Michigan. *Environmental Science & Technology*. 53(21):12227-12237. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b03850>
- LIN, H.; PAN, H.; SUN, J.; DU, R.; XU, J.; LIN, H.; PAN, Z.; ZHUANG, M. 2023. Transboundary microplastic pollution in Xiamen Bay and adjacent Jiulong River estuary after the outbreak of COVID-19. *Science of the Total Environment*. 861:160562. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160562>
- LIN, L.; PAN, X.; ZHANG, S.; LI, D.; ZHAI, W.; WANG, Z.; TAO, J.; MI, C.; LI, Q.; CRITTENDEN, J.C. 2021. Distribution and source of microplastics in China's second largest reservoir – Danjiangkou Reservoir. *Journal of Environmental Sciences*. 102:74-64. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2020.09.018>
- LIU, Y.; CAO, W.; HU, Y.; ZHANG, J.; SHEN, W. 2022. Horizontal and vertical distribution of microplastics in dam reservoir after impoundment. *Science of the Total Environment*. 832:154962. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154962>
- PENG, G.; XU, P.; ZHU, B.; BAI, M.; LI, D. 2018. Microplastics in freshwater river sediments in Shanghai, China: A case study of risk assessment in mega-cities. *Environmental Pollution*. 234:448-56. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.11.034>

- PLASTICS EUROPE. 2023. Plastics – the fast Facts 2023. Plastics Europe. Disponible desde Internet en: <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-fast-facts-2023/>
- RODRÍGUEZ CORTÉS, L.M. 2021. Espacios de peces y energía. La transformación del río Magdalena en el centro del Huila: la represa de Betania. En: Escuela Internacional de Negocios y Desarrollo Empresarial de Colombia – EIDEC; Centro de Investigación Científica, Empresarial y Tecnológica de Colombia – CEINCET; Red de Investigación en Educación, Empresa y Sociedad – REDIEES. La Investigación Científica y Académica Transdisciplinaria. Colección científica educación, empresa y sociedad. Primera edición, volumen 13. Eidec Editorial. p.155-183. <https://doi.org/10.34893/nkf9-1593>
- ROJAS-LUNA, R.A.; OQUENDO-RUIZ, L.; GARCÍA-ALZATE, C.A.; ARANA, V.A.; GARCÍA-ALZATE, R.; TRILLERAS, J. 2023. Identification, abundance, and distribution of microplastics in surface water collected from Luruaco Lake, low basin Magdalena River, Colombia. *Water*. 15(2):344. <https://doi.org/10.3390/w15020344>
- ROSE, P.K.; JAIN, M.; KATARIA, N.; SAHOO, P.K.; GARG, V.K.; YADAV, A. 2023. Microplastics in multimedia environment: A systematic review on its fate, transport, quantification, health risk, and remedial measures. *Groundwater for Sustainable Development*. 20:100889. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2022.100889>
- SHRUTI, V.C.; JONATHAN, M.P.; RODRÍGUEZ-ESPINOSA, P.F.; RODRÍGUEZ-GONZÁLES, F. 2019. Microplastics in freshwater sediments of Atoyac River basin, Puebla City, Mexico. *Science of the Total Environment*. 654(1):154-163. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.054>
- SONG, J.; HOU, C.; ZHOU, Y.; LIU, Q.; WU, X.; WANG, Y.; YI, Y. 2020. The flowing of microplastics was accelerated under the influence of artificial flood generated by hydropower station. *Journal of Cleaner Production*. 255:120174. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120174>
- TAVŞANOĞLU, Ü.N.; KANKILIÇ, G.B.; AKCA, G.; ÇIRAK, T.; ERDOĞAN, Ş. 2020. Microplastics in a dam lake in Turkey: type, mesh size effect, and bacterial biofilm communities. *Environmental Science and Pollution Research*. 27:45688-45698. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10424-9>
- VAN EMMERIK, T.; SCHWARZ, A. 2019. Plastic debris in rivers. *Wiley Interdisciplinary Reviews*. 7(1):e1398. <https://doi.org/10.1002/wat2.1398>
- VAYGHAN, A.H.; RASTA, M.; ZAKERI, M.; KELLY, F.J. 2022. Spatial distribution of microplastics pollution in sediments and surface waters of the Aras River and reservoir: An international river in Northwestern Iran. *Science of the Total Environment*. 843:156894. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156894>
- WANG, G.; LU, J.; LI, W.; NING, J.; ZHOU, L.; TONG, Y.; LIU, Z.; ZHOU, H.; XIAYIHAZI, N. 2021. Seasonal variation and risk assessment of microplastics in surface water of the Manas River Basin, China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 208:111477. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111477>
- WANG, W.; YUAN, W.; CHEN, Y.; WANG, J. 2018. Microplastics in Surface Waters of Dongting Lake and Hong Lake, China. *Science of the Total Environment*. 633:539-45. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.211>
- WATKINS, L.; MCGRATTAN, S.; SULLIVAN, P.J.; WALTER, M. T. 2019. The effect of dams on river transport of microplastic pollution. *Science of the Total Environment*. 664:834-840. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.028>
- WEIDEMAN, E.A.; PEROLD, V.; RYAN, P.G. 2019. Little evidence that dams in the Orange-Vaal River system trap floating microplastics or microfibres. *Marine Pollution Bulletin*. 149:110664. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110664>
- WU, P.; TANG, Y.; DANG, M.; WANG, S.; JIN, H.; LIU, Y.; JING, H.; ZHENG, C.; YI, S.; CAI, Z. 2020. Spatial-temporal distribution of microplastics in surface water and sediments of Maozhou River within Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area. *Science of the Total Environment*. 717:135187. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135187>
- YANG, S.; ZHOU, M.; CHEN, X.; HU, L.; XU, Y.; FU, W.; LI, C. 2022. A comparative review of microplastics in lake systems from different countries and regions. *Chemosphere*. 286:131806. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131806>
- ZHANG, Y.; PENG, Y.; XU, S.; ZHANG, S.; ZHOU, G.; YANG, J.; LI, H.; ZHANG, J. 2022. Distribution characteristics of microplastics in urban rivers in Chengdu city: The influence of land-use type and population and related suggestions. *Science of the Total Environment*. 846:157411. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157411>
- ZHOU, Y.; WANG, J.; ZOU, M.; JIA, Z.; ZHOU, S. 2020. Microplastics in soils: A review of methods, occurrence, fate, transport, ecological and environmental risks. *Science of the Total Environment*. 748:141368. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141368>

Tratamiento bio-oxidativo de percolados provenientes de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos: un seguimiento espectroscópico

Bio-oxidative treatment of percolates from the organic fraction of municipal solid waste: A spectroscopic monitoring

Sergio Mauricio Betancur-Hincapié¹ ; Isabel Acevedo-Restrepo¹ ; Carlos Alberto Peláez-Jaramillo¹ ; Nora Restrepo-Sánchez^{1*} 

¹Universidad de Antioquia, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Grupo Interdisciplinario de Estudios Moleculares (GIEM), Instituto de Química. Medellín, Colombia; e-mail: sergio.betancur95@gmail.com, disabel.acevedo@udea.edu.co, carlos.pelaez@udea.edu.co, neugenia.restrepo@udea.edu.co

*autor de correspondencia: neugenia.restrepo@udea.edu.co

Cómo citar: Betancur-Hincapié, S.M.; Acevedo-Restrepo, I.; Peláez-Jaramillo, C.A.; Restrepo-Sánchez, N. 2025. Tratamiento bio-oxidativo de percolados provenientes de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos: un seguimiento espectroscópico. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 28(1):e2722. <http://doi.org/10.31910/rudca.v28.n1.2025.2722>

Artículo de acceso abierto publicado por Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, bajo una Licencia Creative Commons CC BY-NC 4.0

Publicación oficial de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Institución de Educación Superior Acreditada en Alta Calidad por el Ministerio de Educación Nacional

Recibido: junio 29 de 2024

Aceptado: mayo 31 de 2025

Editado por: Helber Adrian Arévalo Maldonado

RESUMEN

La gestión de los residuos sólidos urbanos está estrechamente relacionada con el aumento de la población, el desarrollo y el cambio climático. Estos residuos están compuestos por más de un 50 % de materia orgánica y un alto contenido en humedad, lo que conlleva la generación de lixiviados con altas concentraciones de materia orgánica disuelta (MOD) en descomposición y metales pesados, entre otros contaminantes. Esta amenaza a los ecosistemas naturales demanda esfuerzos para encontrar estrategias para su manejo y estabilización. En esta investigación se estudió el impacto de un tratamiento biológico aeróbico sobre la estabilización de la materia orgánica presente en los lixiviados, obtenidos a partir de la fracción orgánica de residuos sólidos separados en origen, como potencial estrategia para la producción de precursores de sustancias pre-húmicas con interés agronómico. Se realizó tratamiento bio-oxidativo con burbujeo de aire, para estabilizar la MOD y se hizo seguimiento cinético de las transformaciones estructurales, a nivel molecular, empleando espectroscopía infrarroja, resonancia magnética nuclear de hidrógeno y carbono y espectroscopía ultravioleta visible. Se identificó que en la MOD, inicialmente, ocurrieron procesos de mineralización de sustancias simples, como aminas y alcoholes y, en tiempos superiores a los 15 días de tratamiento, se formaron compuestos conjugados y estructuras aromáticas precursoras de sustancias húmicas. Los resultados mostraron que el tratamiento empleado puede ser una alternativa para estabilizar los lixiviados provenientes de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos, obteniendo, a su vez, productos de valor agregado, desde un punto de vista agronómico.

Palabras clave: Materia orgánica disuelta; Percolación; Resonancia magnética nuclear de hidrógeno; Sustancias pre-húmicas; Tratamiento aeróbico de lixiviados.

ABSTRACT

The management of municipal solid waste is closely associated with increasing population growth, development, and climate change. These wastes comprise more than 50 % organic matter and high moisture content, leading to the generation of leachate with high concentrations of dissolved organic matter (DOM) in decomposition, heavy metals, and other contaminants. This threat to the natural ecosystems demands efforts to find strategies for their management and stabilization. In this research, the impact of aerobic biological treatment was studied on the stabilization of organic matter present in leachates obtained from the organic fraction of source-separated solid waste (OFMSW), as a potential strategy to produce pre-humic substance precursors with agronomic interest. A bio-oxidative treatment was carried out with air bubbling to stabilize the DOM, and kinetic monitoring of the structural transformations of the DOM was conducted using infrared spectroscopy, hydrogen nuclear magnetic resonance, carbon nuclear magnetic resonance, and ultraviolet-visible spectroscopy. It was identified that the DOM initially underwent mineralization of simple substances such as amines and alcohols. After more than 15 days of treatment, conjugated compounds and aromatic structures, precursors of humic substances, were formed. The results showed that the treatment could be a good alternative to stabilize leachates from the organic fraction of municipal solid waste, generating added-value products from an agronomic perspective.

Keywords: Aerobic treatment of leachate; Dissolved organic matter; Hydrogen nuclear magnetic resonance; Percolate; Precursors of humic substances.

INTRODUCCIÓN

La excesiva generación de residuos sólidos urbanos (RSU) representa uno de los principales desafíos ambientales para la humanidad. Una considerable proporción de los RSU consiste en materia orgánica con altos contenidos de humedad que supera el 60 % en peso (Roy *et al.* 2018). Durante el proceso de descomposición de los RSU, la humedad se libera y atraviesa la fracción sólida, dando lugar a la generación de una corriente líquida de tonalidad oscura y olor desagradable, conocida como lixiviado (Liu *et al.* 2015). Los lixiviados poseen altas concentraciones de materia orgánica disuelta (MOD), sales minerales, iones de metales pesados y contaminantes, como microplásticos y pesticidas (Teng *et al.* 2021), por lo que representan una amenaza potencial a los ecosistemas con los que interactúan (Baderna *et al.* 2019).

Existen muchas opciones para darles un manejo adecuado a los lixiviados, entre las cuales, se destacan los tratamientos biológicos, químicos y fisicoquímicos (Dabaghian *et al.* 2018; Carvajal-Flórez & Cardona-Gallo, 2019; Teng *et al.* 2021). Los tratamientos biológicos suelen ser los más usados, debido a su menor costo, facilidad de uso y bajo impacto ambiental (Teng *et al.* 2021). Estos procesos se enfocan en degradar la MOD, que suele ser el principal contaminante de los lixiviados (State *et al.* 2013), a través de reacciones aerobias o anaerobias.

Para llevar a cabo tratamientos biológicos se suele aumentar la concentración de sustancias orgánicas e inorgánicas hidrosolubles dentro de la matriz líquida (Payandeh *et al.* 2017; Alam *et al.* 2024); para ello, se recircula el lixiviado, mediante la matriz sólida orgánica, de la cual proviene, extrayendo una mayor carga de material disuelto o en suspensión, que se transformará en productos de interés, a través de las reacciones aerobias o anaerobias. Este proceso de extracción se conoce como percolación y a su producto se le denomina percolado. Dentro de la MOD, en el percolado, se encuentran estructuras complejas, como la lignina y la hemicelulosa, así como algunos monosacáridos, aminoácidos, péptidos y ciertas estructuras similares a la tirosina y el triptófano (He *et al.* 2011a; 2013; State *et al.* 2013; Liu *et al.* 2015; Roy *et al.* 2018).

Mediante los tratamientos biológicos aerobios, la MOD se degrada y se estabiliza, a través de procesos promovidos por las actividades metabólicas de los diferentes microorganismos, como bacterias y hongos, presentes en la matriz del percolado (Sossou *et al.* 2024). Durante este tipo de tratamientos se desarrollan procesos de mineralización y pre-humificación (He *et al.* 2013). La mineralización ocurre por la acción de los microorganismos presentes en el percolado, los cuales, utilizan la MOD como fuente energética y de carbono, con el fin de realizar actividades de crecimiento y de replicación.

Este proceso metabólico de degradación tiene lugar, a través de reacciones químicas de oxidación e hidrólisis (Middelburg *et al.* 1993; Chemlal *et al.* 2014). Normalmente, la mineralización se da sobre moléculas orgánicas lábiles y simples, que los microorganismos logran degradar rápidamente (Kang *et al.* 2002; He *et al.* 2013).

Por otro lado, la pre-humificación se da en compuestos orgánicos complejos y resistentes a la degradación microbiana, que implican la acumulación de moléculas de peso molecular considerable que, a través de reacciones de resíntesis, dan como productos estructuras de gran estabilidad, denominadas sustancias pre-húmicas (Cossu & Raga, 2008); entre estas, se encuentran los ácidos pre-húmicos y ácidos pre-fúlvicos, que se caracterizan por tener un gran valor, a nivel agronómico (He *et al.* 2011b).

Las técnicas espectroscópicas estudian los cambios estructurales que sufre la MOD durante los tratamientos de estabilización oxidativa y permiten identificar el grado de estabilidad del percolado en diferentes etapas del tratamiento (Teng *et al.* 2021). La comprensión de la estabilización de la matriz percolado permite definir protocolos de tratamiento para su potencial uso, como enmienda o fertilizante líquido.

Para analizar los cambios en la materia orgánica, se recurre a diferentes técnicas espectroscópicas. La espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) permite identificar los tipos de grupos funcionales presentes en las moléculas disueltas o suspendidas en el percolado. Gracias a esta técnica es posible realizar un seguimiento de los cambios estructurales que experimentan los grupos funcionales de la materia orgánica disuelta (MOD), a lo largo del proceso de estabilización oxidativa, incluyendo las fases de hidrólisis, oxidación y resíntesis (Teng *et al.* 2021).

La espectroscopía de resonancia magnética nuclear (RMN) permite realizar el seguimiento cinético del proceso, aprovechando las señales características que emiten núcleos, como el hidrógeno (^1H) y el isótopo de carbono 13 (^{13}C), al ser sometidos a un campo magnético potente. Estas señales, que varían según la estructura y el entorno químico de las moléculas de la MOD, se manifiestan en espectros con regiones definidas para los núcleos de ^1H y ^{13}C . En esta investigación, se utilizó la RMN para identificar, específicamente, las señales correspondientes a compuestos alifáticos, aromáticos y algunos sustituyentes oxidados (Teng *et al.* 2021).

La espectroscopía UV-Visible (UV-Vis) se usa para el estudio de sistemas conjugados, particularmente, en compuestos aromáticos. La interacción de los electrones π con longitudes de onda específicas de la luz UV-Vis permite analizar las transiciones electrónicas ($\pi \rightarrow \pi^*$), proporcionando información sobre la estructura y extensión de la conjugación en estas moléculas. Se ha reportado que UV-Vis se emplea para observar cambios oxidativos y procesos de resíntesis, que se pueden dar durante la degradación de la MOD (Zhang *et al.* 2020; Teng *et al.* 2021).

Las relaciones entre las absorbancias medidas a diferentes longitudes de onda reflejan cambios estructurales en la materia orgánica disuelta (MOD), como el grado de condensación, la saturación y la aromaticidad, aspectos que pueden servir como índices de pre-humificación. El índice E2/E3 calculado como la relación entre las absorbancias a 250 nm y 365 nm, proporciona información, principalmente, sobre la aromaticidad de las moléculas. Una relación E2/E3 alta se asocia con una menor aromaticidad de la

MOD presente en el percolado, indicando una correlación inversa. Por otro lado, el factor E_4/E_6 (relación entre la absorbancia a 465 nm y 665 nm), se correlaciona con el tamaño molecular de la materia orgánica y su contenido de átomos de oxígeno y nitrógeno. Una relación E_4/E_6 elevada se considera que está inversamente relacionada con el grado de condensación y el grado de pre-humificación de las sustancias pre-húmicas (Helms *et al.* 2008; Qi *et al.* 2012).

En la presente investigación se emplearon técnicas espectroscópicas, como FTIR, RMN de ^1H – RMN, ^{13}C – RMN, así como espectroscopía UV-Vis, para identificar los cambios estructurales que sufre la materia orgánica disuelta (MOD), presente en un percolado, obtenido de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU), durante un proceso de estabilización oxidativa, mediante burbujeo de aire. Comprender la transformación estructural de esta MOD constituye un aspecto conceptual clave para su adecuado manejo y potencial valorización, considerando su origen contaminante. En este contexto, se planteó estabilizar la MOD mediante procesos oxidativos, seguir la cinética de dicha estabilización a lo largo del tratamiento y caracterizar los materiales obtenidos, mediante análisis fisicoquímicos y espectroscópicos, con el fin de evaluar la eficacia del proceso y su posible aplicación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Obtención del percolado. Para obtener aproximadamente 10,0 L de percolado, se utilizaron 30,0 kg de residuos sólidos orgánicos de la ruta selectiva de la planta de aprovechamiento de FORSU, del municipio de Támesis, Antioquia, la cual, se encuentra en su relleno sanitario. Los residuos se molieron y se colocaron en un contenedor de plástico de 23,0 L de capacidad, que incluía, una llave de paso en la parte inferior, para facilitar la recolección del percolado. Posteriormente, el sistema se mantuvo en proceso de lixiviación/percolación por un periodo de diez días, durante el cual, se adicionó, diariamente, 1,0 L de agua destilada y se recircularon 500,0 mL de lixiviado recolectado previamente. El objetivo de esta adición fue humectar los residuos y favorecer el proceso de lixiviación/percolación.

Tratamiento oxidativo del percolado y toma de muestras. Del proceso de lixiviación/percolación anterior se obtuvieron 9,6 L de percolado; se dispuso en un reactor cilíndrico de vidrio con capacidad de 10,0 L y se le inyectó un flujo entre 1,0 – 2,0 L min^{-1} de aire, con la ayuda de dos bombas de aire para acuarios. Este burbujeo de aire se mantuvo durante 70 días, con el fin de mantener un flujo constante de oxígeno, que favoreciera el proceso bio-oxidativo.

Durante el periodo del tratamiento del percolado se tomaron muestras periódicamente (100,0 mL de percolado por medición), para el análisis cinético del proceso. Las muestras se congelaron y liofilizaron; el sólido obtenido se pulverizó y tamizó en malla de 600,0 μm de apertura, para llevar a cabo los estudios espectroscópicos FTIR, RMN y UV – VIS.

Análisis espectroscópicos. Para el FTIR se usó un espectrofotómetro FT-IR compacto alpha II marca Bruker. Los análisis de RMN se realizaron en sobrenadante, que se obtuvo a partir de 0,05 g de la fracción sólida liofilizada, diluida en 1,0 mL de NaOD 0,1 M. La solución de deuteróxido de sodio (NaOD) 40 % p/p se diluyó en agua deuterada (D_2O) hasta 0,1 M. Se utilizó agua deuterada para espectroscopía RMN MagniSolv™, marca Millipore, con grado de deuteración de mínimo 99,9 %. Las mediciones se realizaron en un equipo marca Bruker con una fuente de FID. Para ^1H -RMN se emplearon los parámetros frecuencia magnética 300,17 MHz, ancho espectral 6103,516 Hz, tiempo de toma de 16384 pts, frecuencia de toma de 32768 pts y temperatura de 296,80 K. Para ^{13}C -RMN se emplearon los parámetros frecuencia magnética 75,48 MHz, ancho espectral 24414,062 Hz, tiempo de toma de 16384 pts, frecuencia de toma de 32768 pts y temperatura de 296,80 K. Las mediciones en UV – Visible se realizaron en un espectrofotómetro SCHOTT UviLine 9400, se usó como blanco agua destilada, se utilizaron celdas de cuarzo y se midieron absorbancias a longitudes de onda, comprendidas entre 250 – 665 nm, sobre los extractos acuosos, obtenidos a partir de 0,1 g de la fracción sólida liofilizada, suspendida en 2,0 mL de agua destilada.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Fisicoquímicos

Evidencias cualitativas de la transformación del material. La figura 1 muestra los cambios en el color del percolado durante el tratamiento aerobio. El color inicial amarillo ocre viró a marrón oscuro en las primeras horas y se intensificó con el tratamiento oxidativo. Este cambio se debe a la oxidación de la MOD, principalmente, de moléculas lábiles antioxidantes, como los compuestos fenólicos de materiales vegetales que, en medio acuoso, generan soluciones café oscuro, medibles a 455 nm (Mijangos *et al.* 2006; Dai & Mumper, 2010; Santos Cabral *et al.* 2022). Este comportamiento es típico en estos procesos, donde los microorganismos y el ambiente oxidativo degradan la fracción hidrofílica (péptidos, azúcares, aminoácidos, oligosacáridos) a estructuras hidrofóbicas menos solubles. Según reportes de diferentes autores, esta fracción hidrofóbica contiene estructuras resistentes a la degradación microbiana, como polímeros ligados a carbohidratos de complejos lignocelulósicos, taninos y polifenoles (Said-Pullicino *et al.* 2007a; Said-Pullicino *et al.* 2007b; Massaccesi *et al.* 2013).

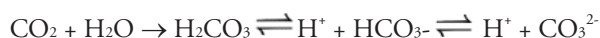
pH del sistema. Al inicio del tratamiento, el pH fue de 5,65. Durante la primera semana, se observó un descenso en los valores, alcanzando $5,18 \pm 0,04$, al segundo día y $5,34 \pm 0,05$, al quinto día. A partir del séptimo día, el pH experimentó un incremento pronunciado, llegando a $6,30 \pm 0,03$ y, posteriormente, a $8,12 \pm 0,01$, al día quince. Este aumento continuó, aunque de forma más gradual, hasta alcanzar un valor de $8,61 \pm 0,03$, al día veintiocho. Entre los días treinta y cincuenta, se produjo un descenso en el pH, que luego se estabilizó, alrededor de $7,64 \pm 0,01$, al día setenta.



Figura 1. Reactor donde se realizó el proceso oxidativo del percolado y las diferentes etapas del proceso de estabilización. a) Percolado al inicio del proceso; b) Percolado después de 1 día de tratamiento; c) Percolado después de 15 días de tratamiento.

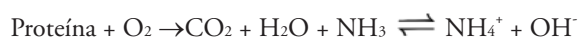
La disminución del pH durante la primera semana del tratamiento podría estar relacionada con la fase de adaptación de los microorganismos endógenos. El incremento de pH, que se evidenció hasta los treinta días, se podría vincular con la fase de crecimiento exponencial de la biomasa microbiana. Finalmente, los cambios de pH, luego de los días, podrían estar asociados con la fase estacionaria (Mason & Egli, 1993). Los cambios en el pH también se pueden relacionar con productos de reacción.

La oxidación de compuestos orgánicos, como carbohidratos, grasas y proteínas, libera dióxido de carbono:



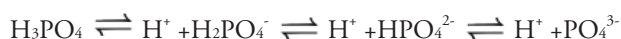
Un aumento en el pH se podría relacionar con la formación de CO_2 que, al solubilizarse, forma ácido carbónico (H_2CO_3). Este ácido se puede disociar en iones bicarbonato o carbonato, influyendo en el pH.

La oxidación de proteínas dará lugar a la formación de amoníaco que, en solución acuosa, presenta un pH básico:



Los procesos de mineralización liberan elementos como azufre y fósforo.

Materia orgánica fosforada + H_2O + enzimas $\rightarrow H_3PO_4$



Otros autores, como Murase & Franks (1989) y Ramaswami *et al.* (2016), han estudiado la reacción de fosfatos con cationes básicos (calcio, magnesio, amonio) e indican que los fosfatos dan lugar a la formación de compuestos insolubles, que favorecen la eliminación de cationes de la solución y el incremento del pH, al neutralizar ácidos y formar sistemas amortiguadores, que funcionan en el rango de pH 6 – 8.

En un tratamiento aerobio de FORSU, la mineralización microbiana es un proceso clave donde los microorganismos descomponen la materia orgánica en compuestos simples y estables. Se ha reportado que, durante este proceso, diversas moléculas que disminuyen el pH, como ácidos grasos volátiles, se pueden formar, debido a la actividad microbiana y, al mismo tiempo, producir aniones básicos, como bicarbonato, carbonato y cationes ácidos, como el amonio y fosfatos que incrementan el pH y la formación de sistemas tampón (State *et al.* 2013).

Espectroscopía FTIR. En la figura 2, se muestra una panorámica general de los FTIR para los días 0, 7, 15, 28 y 53 y la expansión de las zonas de interés, para los días 0, 7 y 53. De los espectros FTIR se observó variación en las intensidades de las bandas de absorción, a medida que avanzó el tratamiento biológico aerobio, con cambios relevantes, a partir del día quince. Estas variaciones son indicios de que ocurren transformaciones estructurales de la MOD durante el

proceso, ya que la desaparición o aparición de bandas, así como cambios en las intensidades, se asocian con transformaciones en grupos funcionales.

Las bandas observadas alrededor de 1100 cm^{-1} y 1080 cm^{-1} (Figura 2b) se pueden atribuir a los estiramientos del enlace C-O de grupos C-OH presentes en polisacáridos, como la celulosa o el almidón. Las bandas situadas en 1019 cm^{-1} , 830 cm^{-1} y 702 cm^{-1} , que aparecen en la muestra del día cincuenta y tres, pueden ser atribuibles a compuestos inorgánicos; por ejemplo, en 1019 cm^{-1} , se podría estar dando el estiramiento asimétrico del grupo sulfato (SO_4^{2-}); la banda de 830 cm^{-1} podría corresponder a vibraciones de flexión asimétrica de sulfatos (SO_4^{2-}) o vibraciones de flexión de fosfatos (PO_4^{3-}). La banda de 702 cm^{-1} se puede relacionar con vibraciones de flexión de enlaces de cloro con metales de transición o de grupos carbonatos (CO_3^{2-}). Lo anterior permite inferir que en el sistema están ocurriendo procesos de mineralización de la MOD, a partir de los cuales, se podrían estar formando sustancias,

como sulfatos, fosfatos y carbonatos (Zeng *et al.* 2021; Rigotto *et al.* 2023), cuya presencia estaría explicando, en parte, los cambios de pH durante el proceso.

En la figura 2c se aprecia una banda situada a 1.405 cm^{-1} , que se asocia con la flexión del grupo OH de compuestos aromáticos fenólicos, indicando que en la MOD hay presencia permanente de este tipo de compuestos, que son de suma importancia para la formación de las sustancias pre-húmicas. En esta figura, también se observa que con el avance del tratamiento va disminuyendo la banda situada alrededor de 1.538 cm^{-1} , desapareciendo al día 53. Esta banda puede ser atribuida a la flexión del enlace N-H de aminas primarias y secundarias, así como al estiramiento C-N de amidas, ambos enlaces presentes en las estructuras de péptidos y proteínas. Estos resultados corresponden con los de la figura 2d, en donde se observa la misma tendencia, a medida que avanza el tratamiento, para las bandas situadas alrededor de 2.960 cm^{-1} , 2.932 cm^{-1} , 2.878 cm^{-1} y la situada entre 3.400 cm^{-1} – 3.100 cm^{-1} .

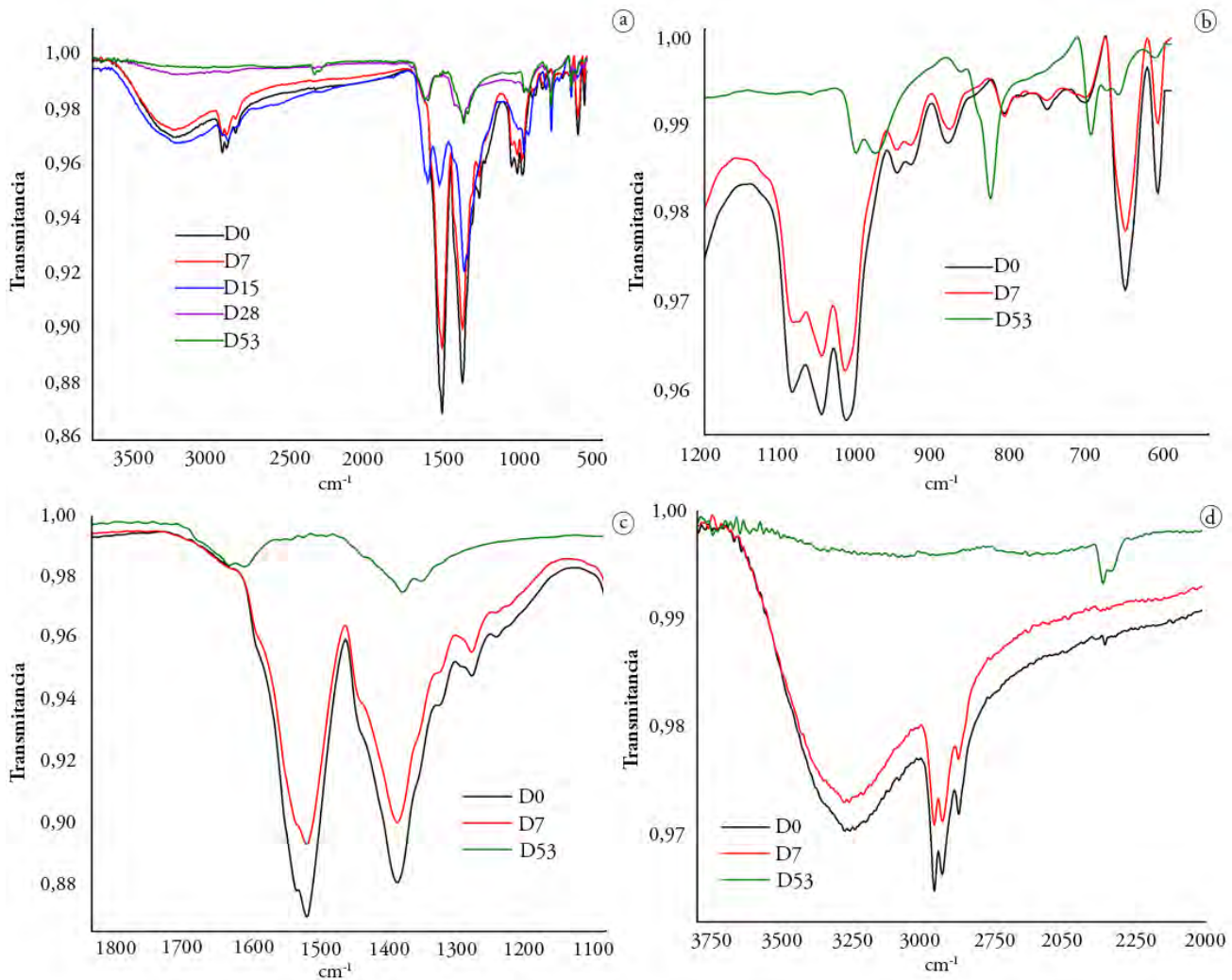


Figura 2. Espectros FTIR de la fracción sólida obtenida a partir del percolado, para: a) Diferentes días de tratamiento; b) 500 cm^{-1} - 1.200 cm^{-1} ; c) 1.200 cm^{-1} - 1.800 cm^{-1} ; d) 2.000 cm^{-1} - 3.750 cm^{-1} .

Teniendo en cuenta que las bandas con número de onda 2.960 cm^{-1} y 2.932 cm^{-1} son características de los estiramientos asimétricos de los enlaces C-H de los grupos metilos (CH_3) y metileno (CH_2) de cadenas alifáticas, que la señal a 2.878 cm^{-1} es característica del estiramiento simétrico del enlace C-H de grupos CH_3 alifáticos y que las bandas alrededor de 3.400 cm^{-1} – 3.100 cm^{-1} se pueden atribuir a estiramientos de enlaces O-H de alcoholes y N-H de aminas o amidas, presentes en la estructura de alcoholes, péptidos, proteínas y carbohidratos, se puede pensar en una transformación de este tipo de sustancias (Dai *et al.* 2023).

Lo expuesto se confirma con el espectro FTIR para el día 53 del proceso, en el que las bandas, anteriormente mencionadas, ya no se aprecian, pero sí se empiezan a evidenciar bandas alrededor de 1.649 cm^{-1} , las cuales, son características de las vibraciones de los enlaces C=C de compuestos aromáticos o del enlace C=O presente en quinonas (Xiaoli *et al.* 2013; Rigotto *et al.* 2023). Asimismo, la banda alrededor de 2.300 cm^{-1} , que se puede relacionar con estiramientos de enlaces dobles (C=C) o triples (C≡C) carbono – carbono, o carbono-nitrógeno (C≡N). La presencia de estos grupos funcionales indica que hubo transformaciones en la MOD,

posiblemente hacia estructuras más complejas y condensadas, que se traducen en una mayor estabilización del percolado (Bolyard *et al.* 2019). Estos mayores estados de oxidación del carbono son consistentes con el tratamiento aerobio aplicado.

La técnica de FTIR también permitió correlacionar las intensidades o absorbancias de las bandas de absorción características de los espectros, lo que permitió tener un panorama acerca de los procesos que se están llevando a cabo dentro de la matriz del percolado. En la tabla 1, se resumen las relaciones entre las absorbancias de las señales características en los diferentes tiempos. Para esto, inicialmente, se realizó la conversión de transmitancia a absorbancia, empleando la expresión Absorbancia = $-\log_{10}$ (Transmitancia).

A partir de las correlaciones presentadas en la tabla 1, se observa que la razón entre las intensidades de las bandas características para compuestos que presentan dobles enlaces C=C, con relación a las bandas de grupos alifáticos, aumenta a medida que avanza el tratamiento. Este resultado sugiere que en la estructura de la MOD ocurren u ocurrieron reacciones químicas que favorecieron el incremento de dobles enlaces y grupos aromáticos.

Tabla 1. Relaciones entre las principales bandas de absorción observadas en los espectros FTIR de la MOD en la matriz del percolado.

Relación entre las absorbancias de las señales características de dobles enlaces y compuestos alifáticos			
Día de muestreo	1650/2930	1650/2850	1650/1400
D0	0,47	0,66	0,13
D7	0,57	0,81	0,16
D15	1,36	1,62	0,56
D28	2,74	3,10	0,71
D53	3,97	4,39	0,65

Los espectros de FTIR permiten identificar que la MOD lábil en la matriz del percolado se está transformando, mientras que las estructuras que tienen una mayor resistencia a los procesos de degradación microbiana podrían estar actuando como bloques para la formación de los compuestos aromáticos condensados, precursores de sustancias pre – húmicas (Enev *et al.* 2014). En este contexto, Xiaoli *et al.* (2013) y Sethi *et al.* (2012), mediante análisis de FTIR, encontraron que las condiciones aeróbicas influyen positivamente en las características químicas del ácido húmico presente en lixiviados, ya que la aireación favorece la oxidación de compuestos orgánicos e incrementa la humificación, mejorando la calidad ambiental del lixiviado tratado y sugiriendo su potencial uso como enmienda agrícola.

Espectroscopía RMN. Los espectros de RMN se caracterizan por definir zonas de cada grupo funcional. Durante el estudio de los procesos de estabilización oxidativa, estos espectros son usados para realizar un seguimiento cinético, a través de las señales de los diferentes tipos de átomos de carbono e hidrógeno, con el fin de visualizar los cambios que está sufriendo la MOD presente en la matriz del percolado (Ussiri *et al.* 2003; He *et al.* 2013).

En la figura 3, se presentan los espectros de ^1H – RMN obtenidos a diferentes tiempos de proceso. En la figura 3a, se observa que al inicio del proceso hay presencia de hidrógenos pertenecientes a grupos metilo y metileno; con el transcurso del tratamiento estos hidrógenos van desapareciendo, indicando una transformación de las moléculas a las que pertenecen. La figura 3b muestra que con el avance del tratamiento van apareciendo hidrógenos pertenecientes a grupos aldehído o aromáticos (Simpson *et al.* 2011).

Una correlación del número de protones (^1H) de las señales más características en la zona de los alifáticos a diferentes tiempos del proceso permitió identificar qué componentes orgánicos tienden a ser los primeros en oxidarse (Kalal & Panday, 2021). Los resultados de estas correlaciones se observan en la tabla 2.

Los resultados presentados en la tabla 2 indican que el ^1H disminuye a medida que avanza el proceso de estabilización, siendo más notoria la disminución de hidrógenos en las señales que aparecen a 1,43 ppm y 3,60 ppm, en los primeros 15 días de tratamiento, en donde las pérdidas de ^1H alcanzan el 54 %, en el

caso de la señal de 1,43 y el 85 %, para la señal de 3,60. Teniendo en cuenta que los desplazamientos químicos del hidrógeno unido a oxígeno y nitrógeno se ubican en el rango amplio entre 1 y 5 ppm, la disminución observada en estas señales podría indicar la rápida oxidación de compuestos lábiles presentes en el percolado, como alcoholes y aminas. Esta interpretación es coherente con lo reportado por Sanguanpak *et al.* (2013), quienes señalaron que

durante la estabilización de lixiviados se degradan, principalmente, compuestos hidrofílicos y nitrogenados. Transcurridos 53 días de tratamiento se encontró que las señales de 2,06 ppm, 1,43 ppm y 3,60 ppm tuvieron una disminución del ¹H superior al 96 %, confirmando la tendencia de compuestos lábiles, como, por ejemplo, aminas y alcoholes a oxidarse, a medida que transcurre el tratamiento.

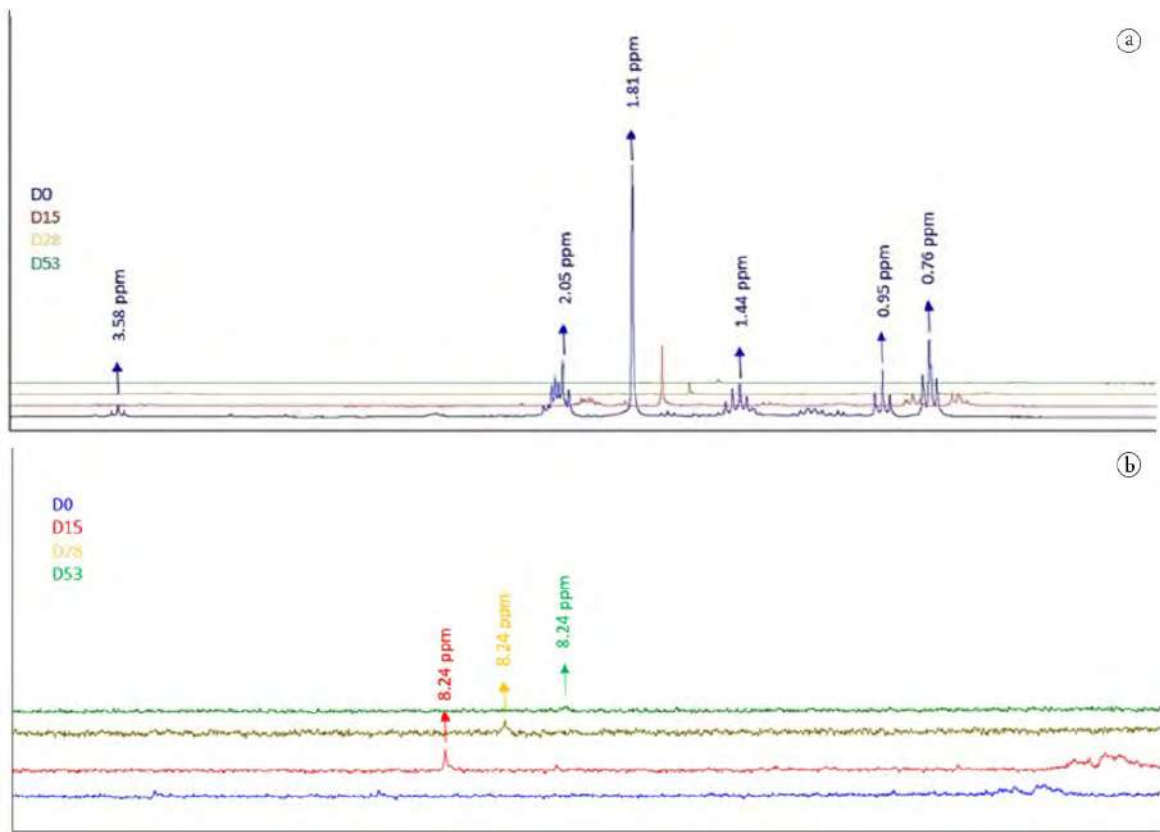


Figura 3. Espectros 1H – RMN; a) Zona entre 0 y 4,0 ppm; b) Zona entre 4,0 y 10,0 ppm

Tabla 2. Relación entre ¹H de diferentes señales a distintos tiempos del proceso de estabilización de la MOD presente en el percolado.

# ¹ H integrado para las señales más características observadas en el espectro			
ppm	# ¹ H D0	# ¹ H D15	# ¹ H D53
0,76	4,28	2,98	0,82
0,96	2,00	2,00	0,21
1,43	2,94	1,35	0,06
1,81	5,01	3,31	1,21
2,06	4,66	2,61	0,07
3,60	1,01	0,15	0,04

Para las señales a 1,81 ppm y 0,76 ppm, pertenecientes a hidrógenos alifáticos, la mayoría de ellos tipo metílicos y, por ende, son más susceptibles a oxidarse por ser grupos terminales, se observó una disminución respectiva del 34 y del 30 % de los ¹H, a los 15 días de tratamiento. Después de 53 días de tratamiento se evidenciaron cambios de las señales de 2,06 ppm, 1,43 ppm y 3,60 ppm (disminución de ¹H del 75,8 % para la señal de 1,81; 80,8 % para la señal de 0,76 y 89,5% para la señal de 0,96), indicando una mayor resistencia a los procesos oxidativos de las moléculas, a las

cuales, pertenecen estos hidrógenos. Según la zona de aparición de estas señales pueden corresponder a compuestos alifáticos β sustituidos, con protones protegidos por efecto de apantallamiento. Esta resistencia a la degradación oxidativa puede ser un indicio de la presencia de estructuras complejas precursoras de reacciones de condensación, cuyo producto sean moléculas de alto peso molecular. Bernat *et al.* (2021) reportaron la presencia de moléculas difíciles de degradar en los lixiviados, como hidrocarburos aromáticos y compuestos fenólicos.

Los resultados obtenidos mediante los espectros de ^1H -RMN sugieren que, mediante el tratamiento biológico al que fue sometido el percolado, tuvieron lugar los procesos de mineralización y pre-humificación esperados (Hussain *et al.* 2023).

En la tabla 3, se presenta el número de carbonos alifáticos y aromáticos encontrados en muestras de percolado, mediante ^{13}C -RMN, a diferentes tiempos de tratamiento, permitiendo evidenciar la existencia de procesos de oxidación y condensación de la MOD presente en el percolado, encontrando que su aromaticidad aumenta a medida que avanza el tiempo del proceso de estabilización biológica. Este resultado es compatible con lo obtenido mediante los espectros de FTIR, a través, de los cuales, se demostró que, a medida que avanza la estabilización oxidativa del percolado, el carácter aromático de la MOD también incrementa. Este aumento de la aromaticidad de la MOD es un buen indicio de que se están dando procesos de pre-humificación (Jouraiphy *et al.* 2008; Dai *et al.* 2023).

Espectroscopía UV – Vis. En la figura 4, se muestran los resultados obtenidos para la medición en el tiempo, de las relaciones E_2/E_3 y E_4/E_6 . Según los resultados para la relación E_2/E_3 , se evidencia un incremento de la pendiente durante los primeros 15 días del tratamiento biológico, tiempo después, cambia de sentido. Este comportamiento se puede relacionar con un incremento en la velocidad de la hidrólisis y degradación oxidativa de los compuestos orgánicos lábiles presentes en el percolado durante este periodo, indicando, además, que durante esta etapa tienen lugar procesos de mineralización. Esto tiene sentido si se tiene en cuenta que dichos procesos son mediados por microorganismos que toman del medio las moléculas más fácilmente asimilables, para llevar a cabo sus procesos metabólicos (Said-Pullicino *et al.* 2007b). La disminución de la relación E_2/E_3 que tiene lugar después de 15 días de tratamiento, se puede asociar con la aparición de estructuras con mayor peso molecular y grado de aromaticidad en el medio (Korak & McKay, 2024).

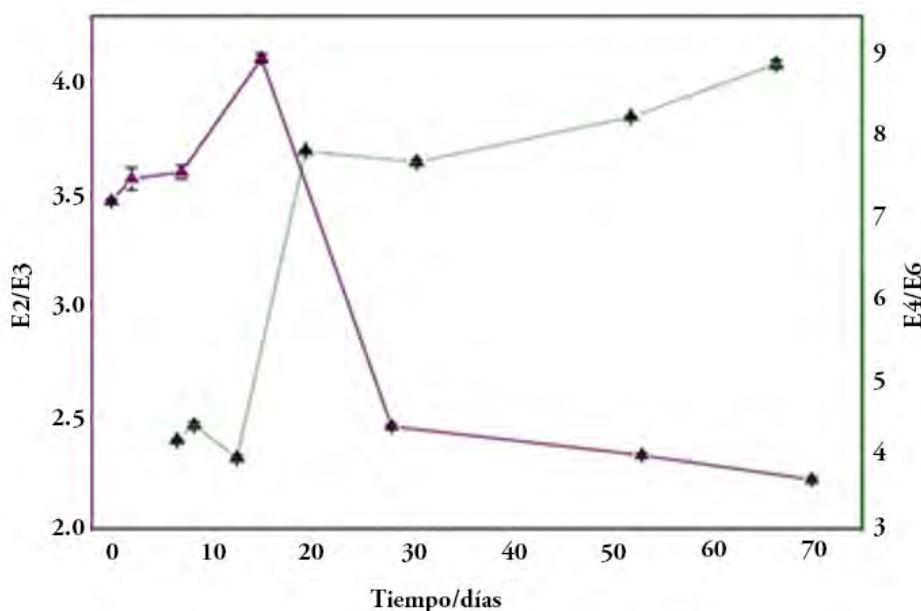


Figura 4. Índices de humificación a partir de los factores E_2/E_3 y el E_4/E_6 .

Tabla 3. Relación entre el número carbonos alifáticos y aromáticos a distintos tiempos del proceso de estabilización de la MOD presente en el percolado.

Carácter aromático de las muestras a medida que avanza el proceso de estabilización aerobia			
Muestra	#C _{Ali}	#C _{Aro}	#C _{Aro} / #C _{Ali} CA
D0	14,0	0,0	0,0
D15	13,0	1,0	0,08
D53	2,0	3,0	1,5

En cuanto a la tendencia de la relación E_4/E_6 , se puede inferir que, si bien la relación E_2/E_3 indica la formación de estructuras conjugadas con tamaños moleculares mayores a los de las moléculas presentes en el material de partida, esto no pudo ser corroborado con E_4/E_6 y, posiblemente, el sistema requiera más tiempo para que se consoliden los procesos de condensación y pre-humificación (Summers *et al.* 1987; Teng *et al.* 2021; Korak & McKay, 2024).

A través del tratamiento biológico realizado, la MOD en el percolado proveniente de la FORSU tiende a estabilizarse mediante procesos de hidrólisis y oxidación en los que, en primera instancia, se da la mineralización de las sustancias más lábiles, como aminas y alcoholes; a medida que el tratamiento transcurre, se observan cambios químicos en la MOD. Estos cambios se traducen en pérdidas de hidrógenos, en el aumento del tamaño de las moléculas, en la formación de sistemas conjugados y de estructuras aromáticas, evidenciando, también, la formación de compuestos precursores de sustancias pre-húmicas, aunque es probable que se requiera más tiempo de tratamiento para poder probar su formación.

Con los resultados se evidencia que el tratamiento biológico aerobio pudiera ser una alternativa de tratamiento para los lixiviados provenientes de la FORSU, obteniéndose un valor agregado, tanto a nivel ambiental como agronómico, ya que durante el proceso, se formaron moléculas precursoras de sustancias que se pudieran usar como enmiendas líquidas, por sus características composicionales y estructurales.

En conjunto, los resultados del presente trabajo sugieren que el tratamiento biológico aerobio del percolado de la FORSU representa una estrategia eficaz para transformar residuos líquidos altamente contaminantes en productos de valor funcional. Más allá de los procesos iniciales de estabilización de la materia orgánica, se observa una evolución estructural, que apunta a la generación de compuestos de mayor complejidad, con características compatibles con sustancias de interés agronómico. Esta transformación convierte un pasivo ambiental en un recurso útil, con potencial para mejorar las propiedades del suelo. En consecuencia, este enfoque no solo contribuye a la gestión sostenible de lixiviados, sino que, también, aporta al aumento de la productividad agrícola y la protección de la soberanía alimentaria.

Agradecimientos. Sergio Mauricio Betancur-Hincapié agradece al Grupo Interdisciplinario de Estudios moleculares GIEM y a Minciencias Convocatoria 852-2019 Programas conectando conocimiento contrato 519-2020 por la financiación del trabajo experimental y el apoyo económico como estudiante de la maestría y como joven investigador. Isabel Acevedo-Restrepo, Carlos Alberto Peláez-Jaramillo y Nora Restrepo-Sánchez agradecen a Minciencias Convocatoria 852-2019 Programas conectando conocimiento contrato 519-2020 por la financiación del trabajo experimental. Contribución de los autores: Sergio Mauricio Betancur-Hincapié: conceptualización, metodología, validación, análisis de resultados, escritura de borrador original. Isabel Acevedo-Restrepo: Análisis de resultados, escritura, revisión y edición. Carlos Alberto Peláez-Jaramillo: Conceptualización, metodología, validación, supervisión, adquisición de fondos, análisis de resultados. Nora Restrepo-Sánchez: Metodología, conceptualización, análisis de resultados,

supervisión, adquisición de fondos, escritura, revisión y edición, administración. Conflicto de intereses: Los autores declaran que no tienen intereses económicos en competencia, ni relaciones personales que pudieran haber influido en el trabajo reportado en este artículo.

REFERENCIAS

- ALAM, P.; KHAN, A.H.; ISLAM, R.; SABI, E.; KHAN, N.A.; ZARGAR, T.I. 2024. Identification of prevalent leachate percolation of municipal solid waste landfill: a case study in India. *Scientific Reports*. 14(1):8910. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-58693-5>
- BADERNA, D.; CALONI, F.; BENFENATI, E. 2019. Investigating landfill leachate toxicity *in vitro*: A review of cell models and endpoints. *Environment International*. 122:21-30. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.11.024>
- BERNAT, K.; ZABOROWSKA, M.; ZIELIŃSKA, M.; WOJNOWSKA-BARYŁA, I.; IGNALEWSKI, W. 2021. Biological treatment of leachate from stabilization of biodegradable municipal solid waste in a sequencing batch biofilm reactor. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 18(5):1047-1060. <https://doi.org/10.1007/s13762-020-02915-6>
- BOLYARD, S.C.; REINHART, D.R.; RICHARDSON, D. 2019. Conventional and fourier transform infrared characterization of waste and leachate during municipal solid waste stabilization. *Chemosphere*. 227:34-42. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.04.035>
- CARVAJAL-FLÓREZ, E.; CARDONA-GALLO, S.A. 2019. Technologies applicable to the removal of heavy metals from landfill leachate. In *Environmental Science and Pollution Research*. 26(16):15725-15753. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04888-7>
- CHEMLAL, R.; AZZOUZ, L.; KERNANI, R.; ABDI, N.; LOUNICI, H.; GRIB, H.; MAMERI, N.; DROUCHE, N. 2014. Combination of advanced oxidation and biological processes for the landfill leachate treatment. *Ecological Engineering*. 73:281-289. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.09.043>
- COSSU, R.; RAGA, R. 2008. Test methods for assessing the biological stability of biodegradable waste. *Waste Management*. 28(2):381-388. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.01.014>
- DABAGHIAN, Z.; PEYRAVI, M.; JAHANSHAH, M.; RAD, A.S. 2018. Potential of Advanced Nano-structured Membranes for Landfill Leachate Treatment: A Review. In *ChemBioEng Reviews*. 5(2):119-138. <https://doi.org/10.1002/cben.201600020>
- DAI, F.; ZHUANG, Q.; HUANG, G.; DENG, H.; ZHANG, X. 2023. Infrared spectrum characteristics and quantification of oh groups in coal. *ACS Omega*. 8(19):17064-17076. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c01336>

- DAI, J.; MUMPER, R.J. 2010. Plant phenolics: Extraction, analysis and their antioxidant and anticancer properties. *Molecules*. 15(10):7313-7352 <https://doi.org/10.3390/molecules15107313>
- ENEV, V.; POSPÍŠILOVÁ, L.; KLUČÁKOVÁ, M.; LIPTAJ, T.; DOSKOČIL, L. 2014. Spectral characterization of selected humic substances. *Soil and Water Research*. 9(1):9-17. <https://doi.org/10.17221/39/2013-swr>
- HE, X.S.; XI, B.D.; LI, X.; PAN, H.W.; AN, D.; BAI, S.G.; LI, D.; CUI, D.Y. 2013. Fluorescence excitation-emission matrix spectroscopy coupled with parallel factor and regional integration analysis to characterize organic matter humification. *Chemosphere*. 93(9):2208-2215. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.04.039>
- HE, X.S.; XI, B.D.; WEI, Z.M.; JIANG, Y.H.; GENG, C.M.; YANG, Y.; YUAN, Y.; LIU, H.L. 2011b. Physicochemical and spectroscopic characteristics of dissolved organic matter extracted from municipal solid waste (MSW) and their influence on the landfill biological stability. *Bioresource Technology*. 102(3):2322-2327. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.10.085>
- HE, X.S.; XI, B.D.; WEI, Z.M.; JIANG, Y.H.; YANG, Y.; AN, D.; CAO, J.L.; LIU, H.L. 2011a. Fluorescence excitation-emission matrix spectroscopy with regional integration analysis for characterizing composition and transformation of dissolved organic matter in landfill leachates. *Journal of Hazardous Materials*. 190(1-3):293-299. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.03.047>
- HELMS, J.R.; STUBBINS, A.; RITCHIE, J.D.; MINOR, E.C.; KIEBER, D.J.; MOPPER, K. 2008. Absorption spectral slopes and slope ratios as indicators of molecular weight, source, and photobleaching of chromophoric dissolved organic matter. *Limnology and Oceanography*. 53(3):955-969. <https://doi.org/10.4319/lo.2008.53.3.0955>
- HUSSAIN, S.; ANEGGI, E.; COMUZZI, C.; BADERNA, D.; ZUCCACCIA, D.; TROVARELLI, A.; GOI, D. 2023. Abatement of the ecotoxicological risk of landfill leachate by heterogeneous Fenton-like oxidation. *Environmental Science and Pollution Research*. 30(8):21025-21032. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23682-6>
- JOURAIPHY, A.; AMIR, S.; WINTERTON, P.; EL GHAROUS, M.; REVEL, J. C.; HAFIDI, M. 2008. Structural study of the fulvic fraction during composting of activated sludge-plant matter: Elemental analysis, FTIR and ¹³C NMR. *Bioresource Technology*. 99(5):1066-1072. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.02.031>
- KALAL, R.; PANDAY, D. 2021. Kinetics and correlation analysis of reactivity in the oxidation of aliphatic primary alcohols by isoquinolinium dichromate in non-aqueous medium. *Journal of the Indian Chemical Society*. 98(2):100009. <https://doi.org/10.1016/j.jics.2021.100009>
- KANG, K.H.; SHIN, H.S.; PARK, H. 2002. Characterization of humic substances present in landfill leachates with different landfill ages and its implications. In *Water Research*. 36(16):4023-4032. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(02\)00114-8](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00114-8)
- KORAK, J.A.; MCKAY, G. 2024. Critical review of fluorescence and absorbance measurements as surrogates for the molecular weight and aromaticity of dissolved organic matter. *Environmental Science: Processes and Impacts*, 26:1663-1702. <https://doi.org/10.1039/d4em00183d>
- LIU, Z.P.; WU, W.H.; SHI, P.; GUO, J.S.; CHENG, J. 2015. Characterization of dissolved organic matter in landfill leachate during the combined treatment process of air stripping, Fenton, SBR and coagulation. *Waste Management*. 41:111-118. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.03.044>
- MASON, C.A.; EGLI, T. 1993. Dynamics of microbial growth in the decelerating and stationary phase of batch culture. Starvation in Bacteria. En: Kjelleberg, S. *Starvation in Bacteria*. Springer. E.E.U.U. p.81-102. https://doi.org/10.1007/978-1-4899-2439-1_4
- MASSACCESI, L.; SORDI, A.; MICALÉ, C.; CUCINA, M.; ZADRA, C.; DI MARIA, F.; GIGLIOTTI, G. 2013. Chemical characterization of percolate and digestate during the hybrid solid anaerobic digestion batch process. *Process Biochemistry*. 48(9):1361-1367. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2013.06.026>
- MIDDELBURG, J.J.; VLUG, T.; JACO, F.; VAN DER NAT, W.A. 1993. Organic matter mineralization in marine systems. *Global and Planetary Change*. 8(1-2):47-58. [https://doi.org/10.1016/0921-8181\(93\)90062-S](https://doi.org/10.1016/0921-8181(93)90062-S)
- MIJANGOS, F.; VARONA, F.; VILLOTA, N. 2006. Changes in solution color during phenol oxidation by Fenton reagent. *Environmental Science and Technology*. 40(17):5538-5543. <https://doi.org/10.1021/es060866q>
- MURASE, N.; FRANKS, F. 1989. Salt precipitation during the freeze-concentration of phosphate buffer solutions. *Biophysical Chemistry*. 34(3):293-300. [https://doi.org/10.1016/0301-4622\(89\)80066-3](https://doi.org/10.1016/0301-4622(89)80066-3)
- PAYANDEH, P.E.; MEHRDADI, N.; DADGAR, P. 2017. Study of biological methods in landfill leachate treatment. *Open Journal of Ecology*. 7(09):568-580. <https://doi.org/10.4236/oje.2017.79038>
- QI, G.; YUE, D.; NIE, Y. 2012. Characterization of humic substances in bio-treated municipal solid waste landfill leachate. *Frontiers of Environmental Science and Engineering in China*. 6(5):711-716. <https://doi.org/10.1007/s11783-012-0421-z>

- RAMASWAMI, S.; BEHRENDT, J.; WANG, G.; EGGERS, S.; OTTERPOHL, R. 2016. Combining magnesium ammonium phosphate precipitation with membrane processes for ammonia removal from methanogenic leachates. *Water and Environment Journal*. 30(3-4):218-226. <https://doi.org/10.1111/wej.12210>
- RIGOTTO, L.; AQUINO, S.F.; RIGOTTO, J.; SANTOS, G.; SILVA, L.M.L.; SANTIAGO, A.F. 2023. Dynamics of dissolved organic matter (DOM) in waste stabilization ponds: Insights into co-treatment of sanitary sewage and landfill leachate. *Journal of Water Process Engineering*. 55:104236. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104236>
- ROY, D.; AZAÏS, A.; BENKARAACHE, S.; DROGUI, P.; TYAGI, R.D. 2018. Composting leachate: characterization, treatment, and future perspectives. In *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*. 17(2):323-349. <https://doi.org/10.1007/s11157-018-9462-5>
- SAID-PULLICINO, D.; ERRIQUENS, F.G.; GIGLIOTTI, G. 2007a. Changes in the chemical characteristics of water-extractable organic matter during composting and their influence on compost stability and maturity. *Bioresource Technology*. 98(9):1822-1831. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.06.018>
- SAID-PULLICINO, D.; KAISER, K.; GUGGENBERGER, G.; GIGLIOTTI, G. 2007b. Changes in the chemical composition of water-extractable organic matter during composting: Distribution between stable and labile organic matter pools. *Chemosphere*. 66(11):2166-2176. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.09.010>
- SANGUANPAK, S.; CHIEMCHAI SRI, C.; CHIEMCHAI SRI, W.; YAMAMOTO, K. 2013. Removal and transformation of dissolved organic matter (DOM) during the treatment of partially stabilized leachate in membrane bioreactor. *Water Science and Technology*. 68(5):1091-1099. <https://doi.org/10.2166/wst.2013.350>
- SANTOS CABRAL, M.M.; BASTOS DE ALMEIDA, Y.M.; CARDOSO ANDRADE, S.A.; SILVA CALDAS, C.; DUARTE DE FREITAS, J.; BEZERRA COSTA, C.A.C.; SOLETTI, J.I. 2022. Influence of phenolic compounds on color formation at different stages of the VHP sugar manufacturing process. *Scientific Reports*. 12:19922. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-24455-4>
- SETHI, S.; KOTHIAL, N.C.; NEMA, A.K. 2012. Validation of enhanced stabilization of municipal solid waste under controlled leachate recirculation using FTIR and XRD. *Journal of Environmental Science & Engineering*. 54(3):323-330.
- SIMPSON, A.J.; MCNALLY, D.J.; SIMPSON, M.J. 2011. NMR spectroscopy in environmental research: From molecular interactions to global processes. *Progress in Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy*. 58(3-4):97-175. <https://doi.org/10.1016/j.pnmrs.2010.09.001>
- SOSSOU, K.; BALA PRASAD, S.; AGBOTSOU, K.E.; SAIDOU SOULEY, H.; MUDIGANDLA, R. 2024. Characteristics of landfill leachate and leachate treatment by biological and advanced coagulation process: Feasibility and effectiveness – An overview. *Waste Management Bulletin*. 2(2):181-198. <https://doi.org/10.1016/j.wmb.2024.04.009>
- STATE, W.; CHATTERJEE, N.; FLURY, M.; HINMAN, C.; COGGER, C.G. 2013. Chemical and physical characteristics of compost leachates - A review - Report prepared for the Washington State Department of Transportation. Disponible desde internet: <https://www.wsdot.wa.gov/research/reports/fullreports/819.1.pdf>
- SUMMERS, R.S.; CORNEL, P.K.; ROBERTS, P.V. 1987. Molecular size distribution and spectroscopic characterization of humic substances. *The Science of the Total Environment*. 62:27-37. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(87\)90478-5](https://doi.org/10.1016/0048-9697(87)90478-5)
- TENG, C.; ZHOU, K.; PENG, C.; CHEN, W. 2021. Characterization and treatment of landfill leachate: A review. In *Water Research*. 203:117525. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117525>
- USSIRI, D.A.N.; JOHNSON, C.E. 2003. Characterization of organic matter in a northern hardwood forest soil by ¹³C NMR spectroscopy and chemical methods. *Geoderma*. 111(1-2):123-149. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(02\)00257-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(02)00257-4)
- XIAOLI, C.; YONGXIA, H.; GUIXIANG, L.; XIN, Z.; YOUCAI, Z. 2013. Spectroscopic studies of the effect of aerobic conditions on the chemical characteristics of humic acid in landfill leachate and its implication for the environment. *Chemosphere*. 91(7):1058-1063. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.01.052>
- ZENG, Y.; CHEN, Z.; DU, Y.; LYU, Q.; YANG, Z.; LIU, Y.; YAN, Z. 2021. Microbiologically induced calcite precipitation technology for mineralizing lead and cadmium in landfill leachate. *Journal of Environmental Management*. 296:113199. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113199>
- ZHANG, Z.; TENG, C.; ZHOU, K.; PENG, C.; CHEN, W. 2020. Degradation characteristics of dissolved organic matter in nanofiltration concentrated landfill leachate during electrocatalytic oxidation. *Chemosphere*. 255:127055. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127055>

Áreas verdes y vivienda de interés social: histórico déficit de bienestar ambiental

Green areas and low-income housing: historic environmental welfare deficit

Martha Lucia Ortiz-Moreno^{1*} ; Clara Inés Caro-Caro¹ 

¹Universidad de los Llanos, Villavicencio, Grupo de Investigación en Sustentabilidad Ambiental (SUSA). Meta, Colombia; e-mail: mlortiz@unillanos.edu.co; clarainescaro@unillanos.edu.co

*autor de correspondencia: mlortiz@unillanos.edu.co

Cómo citar: Ortiz-Moreno, M.L.; Caro-Caro, C.I. 2025. Áreas verdes y vivienda de interés social: histórico déficit de bienestar ambiental. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 28(1):e2595. <http://doi.org/10.31910/rudca.v28.n1.2025.2595>

Artículo de acceso abierto publicado por Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, bajo una Licencia Creative Commons CC BY-NC 4.0

Publicación oficial de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Institución de Educación Superior Acreditada en Alta Calidad por el Ministerio de Educación Nacional

Recibido: marzo 31 de 2024

Aceptado: enero 15 de 2025

Editado por: Sandra Quijas

RESUMEN

La situación socioeconómica ha demandado la intervención de las entidades para suministrar vivienda a la población más vulnerable. En este sentido, el objetivo de este trabajo fue analizar proyectos de vivienda de interés social (VIS) y su oferta de bienestar ambiental, empleando, como área de estudio, la ciudad de Villavicencio, una de las más importantes de la ecorregión de la Amazonia. Para ello, se realizó el análisis estructural del paisaje en los proyectos VIS La Madrid y Betty Camacho. Se emplearon imágenes satelitales vectorizadas en pantalla en QGIS 3.18; las coberturas vegetales fueron validadas con registros fotográficos georreferenciados. El análisis de métricas del paisaje fue realizado con el plugin LECOS. La percepción del bienestar fue realizada mediante análisis de contenido de entrevistas semi estructuradas. El soporte a la biodiversidad fue evaluado mediante mapas de calor de registros biológicos obtenidos del GBIF. Las características de las coberturas de las áreas verdes son deficientes para la oferta de servicios ecosistémicos importantes, como el soporte a la biodiversidad, confort térmico o el generar espacios para la recreación de la comunidad adyacente. Este escenario obedece a que prima el interés económico sobre el bienestar ambiental y a serios vacíos de planeación territorial. Por ende, se espera que estos resultados contribuyan a que los futuros proyectos VIS que se desarrollen en Colombia reconsideren sus criterios de ordenamiento, donde se dé la debida importancia a la oferta de servicios ecosistémicos y el bienestar social.

Palabras clave: Bienestar ambiental; Biodiversidad; Desarrollo urbano; Sustentabilidad; Zonas verdes.

ABSTRACT

The intervention of entities has been necessary to provide housing for the most vulnerable populations due to the socioeconomic situation. This work aims to analyze social interest housing projects (VIS) and their environmental welfare offer in Villavicencio, one of the most important cities in the Amazonia ecoregion. A structural landscape analysis was carried out in the VIS projects La Madrid and Betty Camacho to achieve this. In this study, satellite images were processed using QGIS 3.18 software and validated with georeferenced photographic records to determine vegetation covers. Landscape metrics analysis was conducted using the LECOS plugin. The perception of well-being was evaluated through content analysis of semi-structured interviews. Biodiversity support was assessed using heat maps of biological records obtained from GBIF. The cover characteristics of these green areas are inadequate for providing important ecosystem services such as supporting biodiversity, providing thermal comfort, or creating recreational spaces for the adjacent community. This scenario is due to the fact that economic interests take precedence over environmental welfare and to serious gaps in territorial planning. Therefore, these results may contribute to future VIS projects in Colombia by prompting a reconsideration of planning criteria that prioritize the supply of ecosystem services and social welfare.

Keywords: Biodiversity; Environmental well-being; Green zones; Sustainability; Urban development.

INTRODUCCIÓN

La crisis socio económica genera una importante brecha para el acceso a la vivienda en los grupos familiares del mundo y en Colombia (Lee, 2016; Salvi del Pero *et al.* 2016; Chakwizira, 2019). Específicamente, en Colombia, existen factores que aumentan la dificultad el acceso a la vivienda digna, como el desplazamiento poblacional relacionado con el conflicto armado, la falta de planeación para la gestión del riesgo a desastres naturales, así como la especulación inmobiliaria en los centros urbanos (Alfonso R., 2019; Few *et al.* 2021; Sanjinés & Quinónez, 2022; Yunda *et al.* 2022).

Desde el punto de vista demográfico, Colombia aún cuenta con una población en constante crecimiento, con tasas de natalidad positivas y en el orden del reemplazo poblacional (aproximadamente, 2 hijos por mujer), lo cual, implica que, a la par, la demanda por vivienda familiar es creciente y no tiene perspectivas de disminuir (Ramos Jaraba *et al.* 2020; Yunda *et al.* 2022). Por ello, se considera fundamental el papel del Estado para garantizar el acceso a vivienda digna para los hogares de bajos ingresos, a través de los proyectos de vivienda de interés social (VIS) (Torres Ramírez & Pérez Pérez, 2007).

La VIS en Colombia se orienta a ofrecer soluciones habitacionales en proyectos de autoconstrucción (Sullivan & Ward, 2012) o de construcción institucional, que permite acceder a los beneficiarios a un mínimo habitacional que prevenga fenómenos, como la indigencia y la precarización de la calidad de vida, a través de malas prácticas de arrendamiento para las familias de bajos ingresos (Torres Ramírez & Pérez Pérez, 2007; Uribe Tami, 2019; Lombard *et al.* 2021).

En los proyectos de autoconstrucción, el Estado o las entidades territoriales ofrecen el terreno, opciones de diseño básico arquitectónico y subsidian los materiales requeridos, para que el beneficiario, como contraprestación, ofrezca su trabajo para completar el diseño establecido, contando con libertad para hacerle modificaciones, de acuerdo con sus necesidades e ingresos (Sullivan & Ward, 2012); sin embargo, este tipo de proyectos cada vez son menos frecuentes por las dificultades operativas de gestión y control en los mismos para las entidades oferentes (Lozano Serna *et al.* 2018).

En los proyectos completamente construidos, el Estado ofrece el terreno y terceriza la construcción, mediante un proceso licitatorio a una empresa del sector de la construcción y los beneficiarios acceden a las unidades habitacionales, mediante convocatorias institucionales o por priorización socioeconómica o de vulnerabilidad (Donoso Gomez, 2018). En estas fases, se han detectado deficiencias que comprometen el bienestar de sus beneficiarios, como habilitar terrenos para VIS sin tener en cuenta limitaciones naturales para su construcción (Yunda *et al.* 2022) o desarrollar en sectores aislados del centro urbano (“periferia”) sin planear mecanismos de transporte eficiente, ni la oferta de servicios básicos, como salud, educación y de desarrollo de actividades

económicas para los habitantes (Matsuyuki *et al.* 2020; Arellana *et al.* 2021).

Además, se pueden dar proyectos que no se adecúan a los requerimientos técnicos por negligencia o corrupción causando rápido deterioro de las VIS y un riesgo para sus habitantes (Alfonso R., 2019). Por otra parte, también se han encontrado incongruencias en la asignación de las unidades habitacionales por tráfico de influencias, llevando a que personas con buenos ingresos accedan a ser beneficiarios VIS y acaban empleándolos como rentas adicionales o revendiéndolos (López López *et al.* 2017; Wainer & Vale, 2021), mientras que las familias más necesitadas no tienen oportunidades de acceso a las VIS (Smith *et al.* 2023).

Una vez las familias se hacen acreedores al beneficio VIS han evidenciado que los proyectos habitacionales no contemplan espacios para la recreación, la interacción social, ni unas condiciones de medio ambiente sano dignas, a pesar de ser ofertadas por el Estado (López López *et al.* 2017; Yunda *et al.* 2022). Esto va en contra de su derecho al disfrute del bienestar ambiental, entendido como aquel que permite la salud humana y la sustentabilidad ecológica, al comprender, entre otros aspectos, casas de calidad y saludables, con acceso a áreas verdes (Ismail *et al.* 2017). Además, incluye el derecho a gozar de buena calidad del aire, agua, suelo y la oferta de funciones ambientales de los ecosistemas sanos, que permitan la salud física y mental de las personas, promoviendo una vida sana y en equilibrio; por ende, involucra la salud ambiental y la gestión adecuada del entorno (OPS, 2024).

En este sentido, el objetivo del presente trabajo fue analizar proyectos de vivienda de interés social (VIS) y su oferta de bienestar ambiental, empleando, como área de estudio, la ciudad de Villavicencio, una de las más importantes de la ecorregión de la Amazonia.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio. Villavicencio es un municipio del departamento del Meta, con características de ciudad intermedia y centro regional de servicios para la región de la Amazonia, en Colombia (Figura 1). Según el Departamento Administrativo Nacional de Estadística, este municipio cuenta con, aproximadamente, 500.000 habitantes y una población flotante de unos 200.000 habitantes más (DANE, 2021). Desde el punto de vista demográfico es uno de los municipios del país con mayor tasa de crecimiento y déficit habitacional (DNP, 2019). Por su ubicación geográfica tiene limitaciones para el desarrollo urbano, relacionados con las fallas geológicas, el riesgo de deslizamientos y las inundaciones relacionadas con la cordillera Oriental de los Andes (DNP, 2019; Varón Gutiérrez & Vargas Cuervo, 2019). Además, Villavicencio posee una alta diversidad biológica y desempeña un importante papel en la oferta de servicios ecosistémicos para la Amazonia (Kattan *et al.* 2004; Bystriakova *et al.* 2021; Rodríguez-Zapata & Ruiz-Agudelo, 2021).

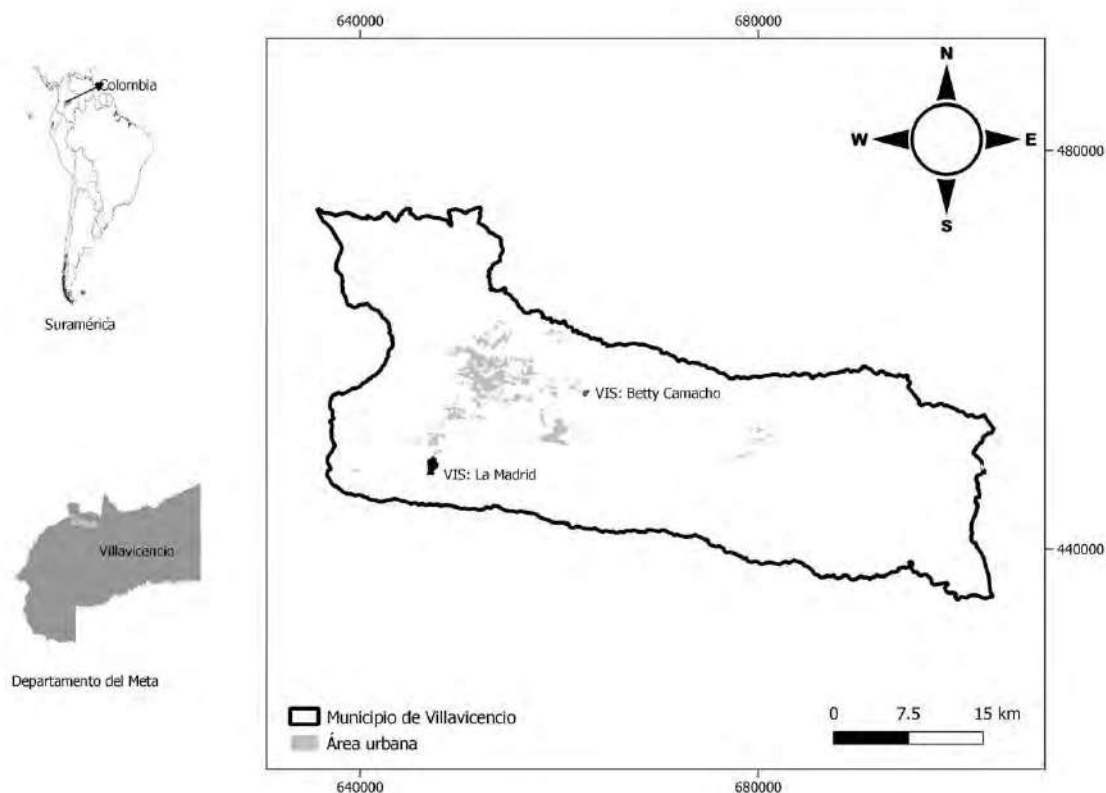


Figura 1. Ubicación del municipio de Villavicencio y los proyectos de Vivienda de Interés Social-VIS La Madrid y Betty Camacho (Villavicencio - Meta, Colombia). Elaborado en QGIS 3.18 con EPSG 32618 (QGIS, 2021).

Se agrega también que, dadas sus características ambientales, Villavicencio fue seleccionada para hacer parte del programa de Biodiversidades (IAvH, 2021). Los proyectos VIS seleccionados para su estudio fueron La Madrid y Betty Camacho, que se distinguen por ser desarrollados con construcción institucional. El barrio La Madrid inició en el 2003, con “La Asociación Programa de Vivienda de Interés Social La Madrid” y en 2006, esta asociación recibió el plan parcial del proyecto; en 2011, el ex alcalde Raúl Franco, inició las obras de 540 casas en la etapa 1 de La Madrid, dejó proyectadas otras 530 casas en la etapa 2 y 1.800 lotes de terreno urbanizados. En el 2013, la etapa 2 y la etapa 1 se entregaron a las familias beneficiarias; durante el periodo de tiempo 2012 a 2016, se han desarrollado proyectos en este barrio que tiene 7 etapas y más de 5.000 viviendas de interés social. En el 2014, se comenzó la construcción de torres de apartamentos, donde el ex gobernador Juan Guillermo Zuluaga, realizó un acuerdo con el Ministerio de Vivienda y se adquirieron 19 ha, para la construcción de 1.122 apartamentos, para ser entregados a personas vulnerables; unos apartamentos se entregaron de forma gratuita, otros amueblados y, otros, por medio de carta-cheque, que tenían personas desplazadas víctimas del conflicto armado (testimonio del líder comunitario Oscar Soto, de la Junta de Acción Comunal La Madrid).

En el caso, del barrio Betty Camacho, se estableció como zona residencial urbana en el 2001, bajo la Resolución No. 50001-1-14-0390, con 1.220 casas; se encuentra en el área de influencia de los asentamientos informales legalizados de La Reliquia y 13 de

mayo, ubicados en el sector de Caños Negros (Concejo Municipal De Villavicencio, 2015 a; b).

Análisis del paisaje urbano. Se realizó el análisis estructural del paisaje en los proyectos VIS La Madrid y Betty Camacho, identificando el área verde disponible, las características de las coberturas vegetales presentes y su conectividad con el paisaje urbano, peri-urbano o rural, según fuera el caso. Para ello, se emplearon imágenes satelitales que fueron vectorizadas en pantalla en QGIS 3.18 (Mwalusepo *et al.* 2017; QGIS, 2021); las coberturas vegetales fueron validadas con registros fotográficos georreferenciados con GPS Garmín 60x y la suite de Google institucional. Las categorías analizadas fueron: jardín, ronda hídrica, parques (con diseño paisajístico) y parques pequeños (solo con mobiliario lúdico), división o separador vial, árboles aislados, terrenos sin construir y áreas verdes asociadas a instituciones educativas (Figura 2). El análisis de métricas del paisaje fue realizado con el plugin LECOS (Jung, 2016). Las métricas estudiadas fueron: LC_Mean: Media del área de los fragmentos del paisaje; LC_Med: Mediana del área de los fragmentos del paisaje; LC_Sum: Suma del área de los fragmentos del paisaje; LC_Min: Área del fragmento menor del paisaje; LC_Max: Área del fragmento mayor del paisaje; LC_SD: Desviación estándar de los fragmentos del paisaje; DIV_SH: Índice de diversidad de Shannon-Wiener del paisaje; DIV_EV: Índice de equitatividad (*Evenness*); DIV_SI: Índice de dominancia de Simpson del paisaje.

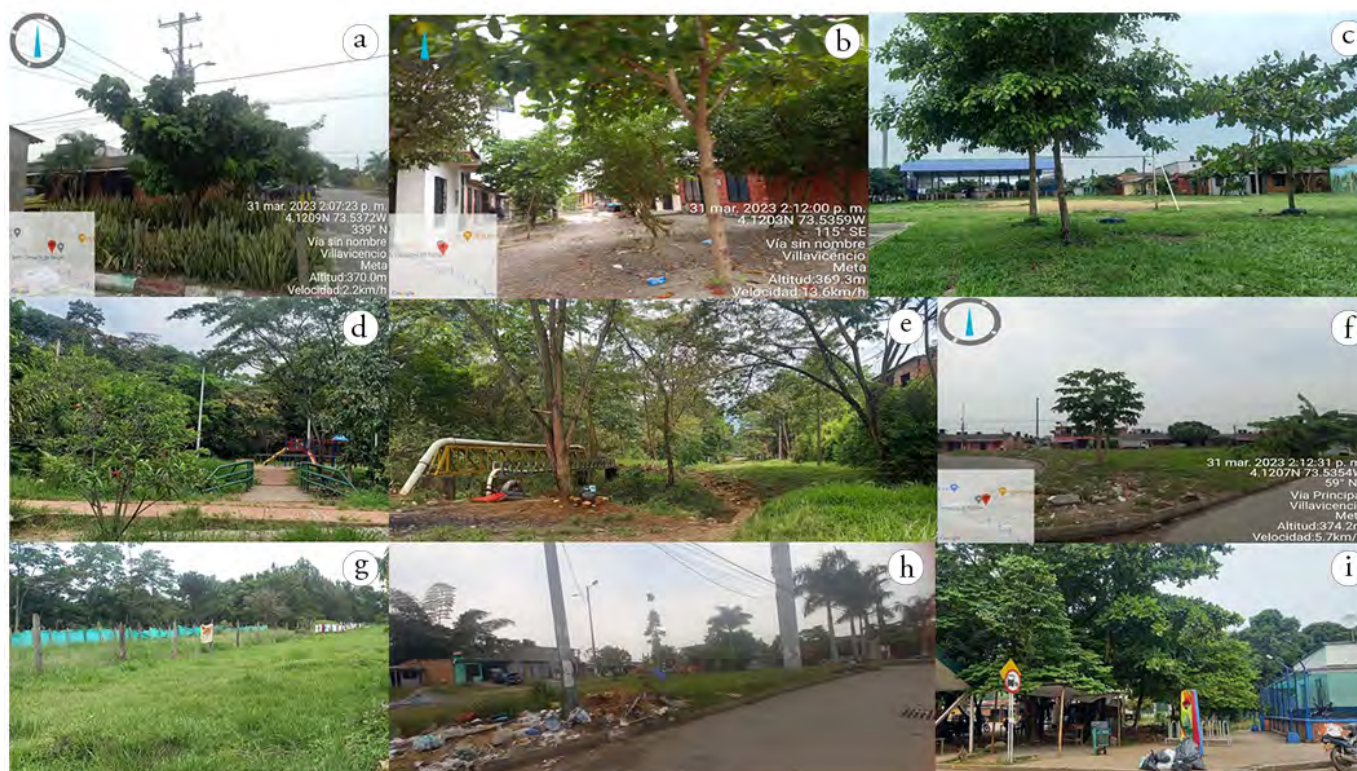


Figura 2. Tipos de áreas verdes y mobiliario urbano distribuidos en los proyectos de Vivienda de Interés Social-VIS La Madrid y Betty Camacho (Villavicencio - Meta, Colombia): a) y b) Jardín; c) Parque; d) Parque pequeño; e) Ronda hídrica; f) y h) División o separador vial y árbol aislado; g) Terreno sin construir; i) Áreas verdes asociadas a instituciones educativas.

Para la estimación de la densidad de área verde por persona, se empleó el número de unidades habitacionales del VIS respecto al número de personas por núcleo familiar, reportados por los habitantes encuestados, ante la falta de cifras oficiales al respecto (Perdigones *et al.* 2023) (Tabla 1). A partir de las imágenes satelitales y los reportes de las Juntas de Acción Comunal (JAC), se estimó 5.000 unidades habitacionales para el proyecto VIS La Madrid (testimonio del líder comunitario Oscar Soto de la JAC) y 1.220 para Betty Camacho. En este análisis no se consideró la subdivisión o subarrendamiento informal de las unidades habitacionales.

Análisis del servicio ecosistémico de soporte a la biodiversidad.

El soporte a la biodiversidad fue evaluado mediante mapas de calor (Smirnova *et al.* 2016); para ello, se usaron las herramientas de simbología en QGIS 3.18 EPSG 32618 (QGIS, 2021), sobre una capa con geometría de puntos para los registros biológicos, reportados por estudios científicos y ciencia ciudadana, dentro del acervo del GBIF (2023), en el área de estudio.

Análisis de la percepción de los habitantes en los VIS.

La percepción del bienestar fue realizada mediante análisis de contenido de entrevistas semi estructuradas a actores clave de los VIS, como miembros de las juntas de acción comunal y líderes comunitarios (Tunison, 2023). Las entrevistas constaban de las siguientes preguntas: ¿Qué percepción tiene sobre las áreas verdes y el mobiliario urbano (sillas, canastas, plazas) de su barrio?; ¿Suele usar el espacio público de su barrio? ¿Cómo?; ¿Considera que las

áreas verdes, el mobiliario urbano y el espacio público de su barrio contribuyen a su bienestar? Las categorías semánticas se definieron después, según el argumento principal de la opinión del encuestado (Bolognesi *et al.* 2017).

En el barrio VIS La Madrid se entrevistaron cinco personas y en el Betty Camacho tres, quienes opinaron sin remuneración económica y autorizaron el uso de sus datos personales. Las características demográficas de los entrevistados se presentan en la tabla 1.

El bajo número de encuestados obedece a la dificultad para lograr la participación de los encuestados en los sectores en estudio, ya que el 2023 fue electoral y existía mucha desconfianza en los habitantes en suministrar información personal. Los participantes en la investigación dieron su consentimiento informado, tal y como lo establecen los requerimientos éticos internacionales e institucionales.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En Colombia, la histórica inestabilidad económica y la fragilidad de los sectores productivos han llevado a una limitada capacidad de ahorro y de acceso al apalancamiento financiero para la adquisición de la vivienda propia familiar (Arbeláez *et al.* 2011). Esta limitación de recursos repercute en un histórico déficit crónico en vivienda familiar de, aproximadamente, 50 %, siendo más precario el acceso a vivienda en los estratos socioeconómicos 1-3, donde se concentran la informalidad

económica y el trabajo a término fijo o a destajo (Torres Ramírez & Pérez Pérez, 2007; Yunda *et al.* 2022). Este escenario hace que la mejor opción para acceder a la vivienda propia sea a través de los programas VIS, del ámbito de las entidades territoriales y que éstos tengan una demanda creciente, sin perspectivas de disminución con las tendencias económicas del país (Yunda *et al.* 2022).

A continuación, se explora las connotaciones de los proyectos VIS para la estructura del paisaje urbano, la oferta de servicios ecosistémicos y la percepción de bienestar ambiental de sus habitantes, empleando, como caso de estudio, los proyectos VIS La Madrid y Betty Camacho (Villavicencio, Colombia).

Tabla 1. Características sociodemográficas de los entrevistados en los proyectos de Vivienda de Interés Social-VIS La Madrid y Betty Camacho (Villavicencio - Meta, Colombia).

VIS	Rango de edad (años)	Actividad económica principal	Estrato socioeconómico percibido*	Tiempo viviendo en el VIS (años)	Habita con su grupo familiar	Personas que conforman el núcleo familiar
La Madrid	19-72	Dos comerciantes Barbería Manicure Ama de casa	1-2	3-10	Si (Todos)	2 hijos Cónyuge Nieto e hijo Mamá, padrastro y hermano Cónyuge y 3 hijas Media: 3,4 personas
Betty Camacho	48-56	Vendedor informal Pensionado Ama de casa	1-3	1-13	Si (Todos)	5 personas (relación no especificada) Cónyuge e hijo 2 hijos Media: 3,6 personas

*De acuerdo con la percepción de su nivel de vida (relación de ingresos y capacidad de consumo).

Análisis del paisaje urbano. El paisaje del barrio La Madrid está conformado por 396 fragmentos de cobertura arbórea y de pastos, que se pueden dividir en las categorías: jardín, ronda hídrica, parques y parques pequeños, división o separador vial, árboles aislados y terrenos sin construir (Figura 3a). El tamaño medio de los fragmentos del paisaje fue 13 ha y la mediana de 10 ha (Tabla 2). Dichos fragmentos representan 929.688,44 ha, principalmente, asociados a las rondas hídricas de los caños Morroco y Zuria (46,62 ha de rondas hídricas, distribuidas en: Caño Zuria: 32,01 ha; Caño Morroco: 11,91 ha y Humedal La Madrid: 2,70 ha) (Figura 3a), donde la ronda hídrica del Caño Zuria tiene gran valor ecológico y es uno de los últimos corredores funcionales del municipio (Castro-Arguello *et al.* 2020); sin embargo, por condiciones de inseguridad estas rondas hídricas no aportan a la recreación activa o pasiva de los habitantes del barrio (Ochoa Amaya *et al.* 2021), aunque sí a su confort térmico (Tabla 3).

El paisaje analizado en La Madrid tiene una desviación estándar de 9,39 ha, donde el fragmento más pequeño es de 10,54 m² y el más grande de 24 ha, lo cual, muestra su alto nivel de heterogeneidad en área de los fragmentos. Desde el punto de vista funcional, el paisaje del barrio ofrece una diversidad de Shannon - Wiener de 2,14, una equitatividad de 0,41, en general bajas y una dominancia de Simpson alta de 0,79 (Mao *et al.* 2023). Una tendencia similar se puede observar para el proyecto VIS Betty Camacho; esto quiere decir, que el paisaje ofrece pocos tipos de hábitat para las especies y el disfrute de los servicios ecosistémicos por parte de sus habitantes (Njoroge *et al.* 2014; Suárez-Castro *et al.* 2022).

El paisaje del proyecto VIS Betty Camacho también está conformado por 396 fragmentos de cobertura arbórea y de pastos distribuidos en las categorías: jardín y árboles aislados, parques y división o separador vial (Figura 3b). El tamaño medio de los fragmentos del paisaje fue 0,3 ha y la mediana de 0,17 ha (Tabla 2). Los fragmentos del paisaje tienen un área entre 0,00015 - 0,76 ha. Dichos fragmentos representan 936,58 ± 9,40 ha, principalmente, asociados a jardines y separadores viales (Tabla 2 y figura 3b), es decir, elementos de vegetación, con fines de ornato y de confort térmico, para cada unidad habitacional. Las rondas hídricas en este VIS no fueron consideradas en el análisis porque no influyen en el continuum del proyecto habitacional, a diferencia de lo que ocurre en La Madrid (Figuras 3a y b).

La estimación del área verde/persona para los VIS analizados fue de: 54,68 ha/persona (La Madrid) y 0,21 ha/persona (Betty Camacho), bajo la consideración de terrenos no urbanizados, que cuentan con vegetación de pastos y árboles. Si para el cálculo se incluyen solo las áreas destinadas a parques (en cualquiera de sus categorías) (Figura 2), se obtiene 0,43 m²/persona en La Madrid y 2,02 m²/persona en Betty Camacho. Los datos indican que el proyecto VIS La Madrid tiene una densidad de área verde/persona inferior a 1 m²/persona, contrario a las recomendaciones de la OMS y de investigadores independientes (Giraldo-Ospina & Vásquez-Varela, 2021; Wahab & Jassim, 2023), lo cual, puede estar vulnerando la salud y el bienestar ambiental percibido por sus habitantes, debido a la deficiencia de parques zonales de calidad (Zin *et al.* 2023).

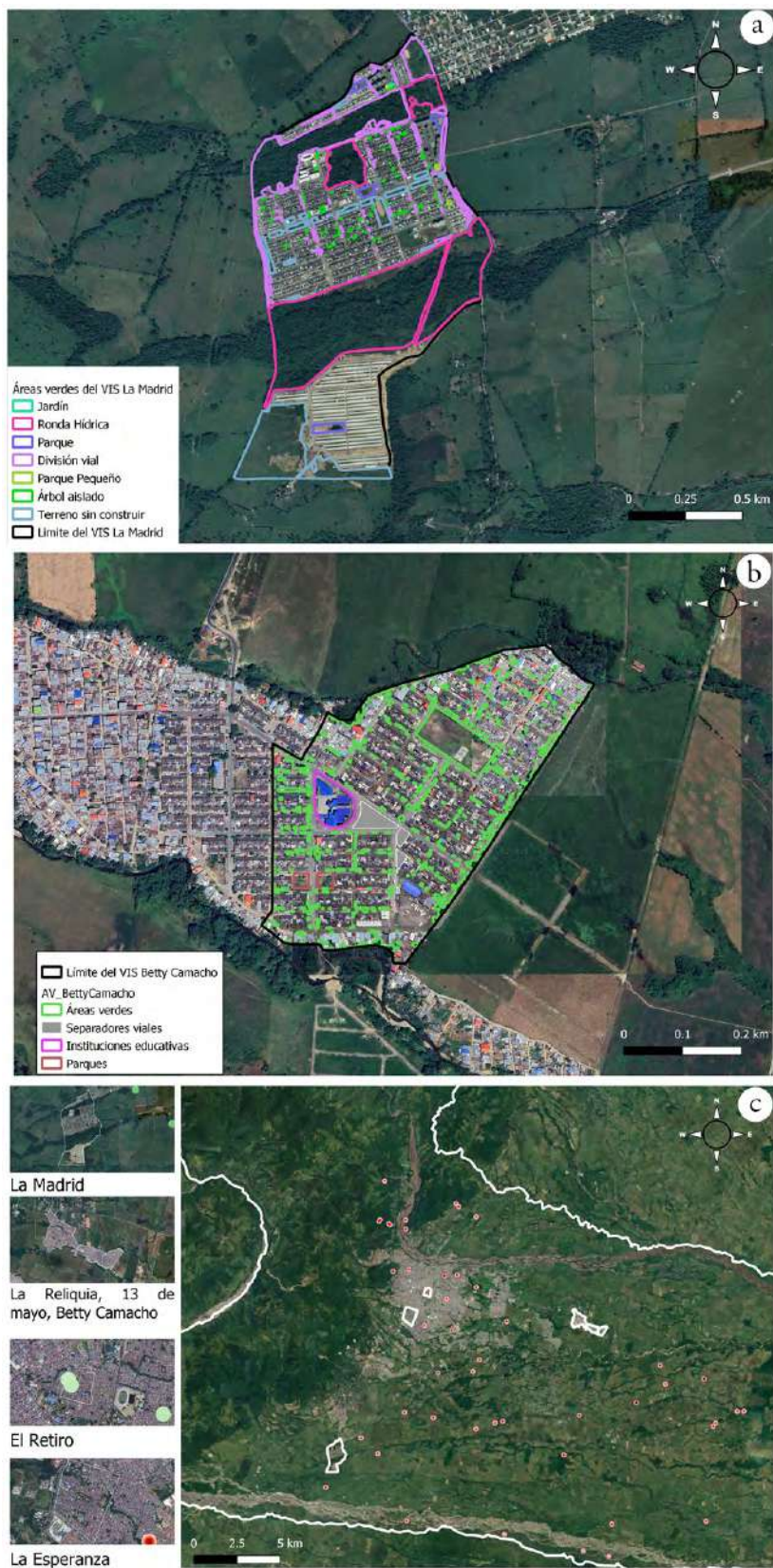


Figura 3. Tipos de áreas verdes y mobiliario urbano. a) Barrio La Madrid; b) Betty Camacho; c) Mapa de calor de los registros biológicos reportados en el área de proyectos VIS de Villavicencio (Meta, Colombia). La coloración roja indica más de cinco registros en la localidad; la coloración verde de 1-4 registros. En la figura se incluye, como referencia, otros proyectos VIS, como: La Reliquia, 13 de mayo, El Retiro y La Esperanza. Elaborado en QGIS 3.18 con EPSG 32618 (QGIS, 2021), empleando el plugin Quickmapservices y los recursos de Google Satellite.

Tabla 2. Métricas del paisaje analizadas en los barrios de Vivienda de Interés Social-VIS La Madrid y Betty Camacho (Villavicencio - Meta, Colombia). Elaborado en QGIS 3.18 con EPSG 32618 (QGIS, 2021), empleando el plugin LECOS y los recursos de Google Satellite.

Barrio	Métrica	Valor
La Madrid	LC_Mean	13,21 ha
	LC_Med	10,15 ha
	LC_Sum	929.688,44 ha
	LC_Min	0,0011 ha
	LC_Max	24,49 ha
	LC_SD	9,40 ha
	DIV_SH	2,14
	DIV_EV	0,41
	DIV_SI	0,79
Betty Camacho	LC_Mean	0,31 ha
	LC_Med	0,18 ha
	LC_Sum	936,58 ha
	LC_Min	0,00015 ha
	LC_Max	0,76 ha
	LC_SD	0,32 ha
	DIV_SH	3,62
	DIV_EV	0,61
	DIV_SI	0,88

En general, se puede indicar que el paisaje en los proyectos VIS La Madrid y Betty Camacho presenta un alto número de fragmentos de cobertura boscosa, principalmente, representados por árboles aislados, jardines y las rondas hídricas de los caños o ríos adyacentes (Figuras 2, 3a y b). A su vez, es importante resaltar que la aplicación de intervenciones para la creación de parques de baja calidad paisajística (con algún mobiliario, pero escasa urbanización), junto con las características de los fragmentos, determinan que existe una limitada oferta de hábitat para las especies terrestres (Figuras 2, 3a y b).

Análisis del servicio ecosistémico de soporte a la biodiversidad.

En el GBIF (2023), se reportaban 172 registros para todos los grupos biológicos (72 % Primates; 20 % Peces; 8 % Aves), en el área del municipio de Villavicencio (Meta, Colombia), los cuales, se concentran en el área rural y periurbana (Figura 3c); sin embargo, el bajo número de registros en el área urbana y los proyectos VIS, a pesar de la alta biodiversidad del municipio (Kattan *et al.* 2004; Bystriakova *et al.* 2021; Rodríguez-Zapata & Ruiz-Agudelo, 2021), se puede deber al subregistro de la naturaleza en el contexto de lo cotidiano y a la baja participación de los habitantes de sectores económicos 1-3, en ejercicios de ciencia ciudadana, debido a la insuficiente promoción en la educación formal y no formal de la que disponen (Figura 3c). En USA se ha identificado que la ciencia ciudadana en comunidades de origen latino y escasos recursos

fortalece su sentido de pertenencia y conocimiento del entorno ambiental, siempre y cuando, los participantes se sientan actores claves de procesos decisorios (Winter *et al.* 2016). A su vez, en España se identificó que la participación de las comunidades en ejercicios de ciencia ciudadana para el monitoreo de problemáticas relacionadas con los mosquitos es clave, para la salud ambiental urbana (Padilla-Pozo *et al.* 2024). Por otra parte, es importante destacar que en las rondas hídricas que flanquean los proyectos VIS estudiados se encuentran reportes biológicos (Figura 3c), lo que sugiere su potencial valor para el soporte de la biodiversidad y que requiere de mayores estudios.

Aunque el análisis de la diversidad florística de las coberturas arbóreas no era objetivo de este trabajo, cabe mencionar que la arborización y especies de ornato empleadas en los proyectos VIS estudiados suelen ser de especies no nativas (Figura 2), lo cual, puede indicar que los VIS, además de no ofrecer suficiente área de hábitat, no generan recursos vitales para la biodiversidad nativa, limitando la oferta de servicios ecosistémicos, como el soporte a la biodiversidad en el contexto urbano, tal y como fue identificado por Potgieter *et al.* (2017), quienes reportaron impactos negativos de las plantas de uso ornamental, en contravía con las recomendaciones del programa de Biodiverciudades hacia Villavicencio (IAvH, 2021).

Tabla 3. Análisis de contenido de las entrevistas a los habitantes de los VIS La Madrid y Betty Camacho (Villavicencio - Meta, Colombia): A) ¿Qué percepción tiene sobre las áreas verdes y el mobiliario urbano (sillas, canastas, plazas) de su barrio?; B) ¿Suele usar el espacio público de su barrio? ¿Cómo?; C) ¿Considera que las áreas verdes, el mobiliario urbano y el espacio público de su barrio contribuyen a su bienestar?

VIS	Individuo	A	Categoría	B	Categoría	C	Categoría
La Madrid	1	Sobre las zonas verdes, ha colaborado con la policía, pues ella es líder del barrio La Madrid, ha sembrado árboles en la avenida y en el parque central, aun así, ella piensa que le falta más arborización y sillas en las áreas verdes.	Falta de mobiliario Falta de vegetación arbórea	Si, realiza actividades físicas y caminar.	Recreación activa	Si contribuyen a su bienestar ya que ella puede salir a tomar aire y refrescarse cuando le sea necesario.	Confort térmico
	2	Sobre las cestas de basura, le parece que hay escasez de éstas, debido a que como no hay, la gente sin educación prefiere botar la basura al piso; en el caso de las sillas, casi siempre se encuentran dañadas y en malas condiciones.	Falta de mobiliario	Si, lo suele utilizar para trotar en la mañana y para llevar a su sobrina a jugar y divertirse un rato con ella.	Recreación activa	Si contribuyen a su bienestar, pero no está de acuerdo en que siempre permanezca sucio y de la mala cultura ciudadana.	Tercer lugar
	3	Hace mucha falta sillas, para los niños, que las áreas estén en buenas condiciones, sin huecos, añadir más mobiliario urbano con lo cual las personas, especialmente los niños puedan tener un verdadero parque.	Falta de mobiliario	Si, para caminar, relajarse, pasar un rato agradable con sus nietos.	Recreación pasiva Tejido social	Si contribuyen a su bienestar, principalmente porque tienen un parque que es importante, que mejora el comercio, lo único que le molesta es que su calle no esté pavimentada.	Actividad económica
	4	Mucho descuido con la limpieza y mantenimiento del parque, las personas no tienen sentido de pertenencia con el mobiliario urbano.	Falta de mobiliario	Si, Realiza deporte (Fútbol).	Recreación activa	Si, en las noches puede distraerse yendo a los parques a jugar fútbol.	Tercer lugar
	5	El mobiliario urbano está bien para los niños.		Si, realiza recreaciones, juega en el espacio de juegos con sus nietas.	Recreación activa Tejido social	Si, porque se puede realizar recreación para despejarse lo cual ayuda a la salud mental.	Tercer lugar
Betty Camacho	6	Hacen mucha falta, la mayoría de los parques no tienen sillas ni canastas.	Falta de mobiliario	Si, vendedor informal.	Actividad económica	Si, demasiado, porque son muy importantes para toda la población, además de que le sirve para su trabajo.	Actividad económica
	7	Falta organización en el cuidado del mobiliario urbano, a las zonas verdes les hacen mantenimiento cada fin de semana.	Falta de mobiliario	Si, realizando deporte, compartiendo con su hijo.	Recreación activa Tejido social	Si, dándole la gratitud de poder compartir y distraerse con su familia.	Tejido social
	8	Le causa preocupación pues ella opina que está en abandono, le falta muchísimo para que sea un área verde adecuada para la comunidad.	Falta de mobiliario Falta de vegetación arbórea	Si, realizando actividades al aire libre.	Recreación activa	Si, porque en el caso de los árboles, le ayudan mucho para tomar fresco.	Confort térmico

Análisis de la percepción de los habitantes en los VIS. En cuanto a la percepción de las áreas verdes y sus características, todos los entrevistados consideraron que eran deficientes en mobiliario urbano (además de cuidado y mantenimiento de este) y 25 % que, además, eran deficientes en cobertura arbórea. Las áreas verdes son percibidas por los actores entrevistados como una tricotomía, es decir, 1) se consideran como positivas para la salud y bienestar humano; pero, por otra parte, su uso común y falta de control lleva a 2) ser consideradas como espacios inseguros y 3) espacios de abandono para el descarte inadecuado de residuos sólidos (Orlandi *et al.* 2022) (Tabla 3). Este escenario hace que su gestión en los proyectos VIS sea desafiante, ya que implica un fuerte componente de educación ambiental y monitoreo permanente, para que las familias los puedan percibir como lugares agradables y seguros (Hernández-Pulgarín *et al.* 2020; Swensen & Berg, 2020).

Los habitantes indicaron las áreas verdes como lugares importantes para recrear y construir tejido social, siendo el tercer lugar, que permite la socialización amplia con la familia y las personas del sector.

Las áreas verdes se consideran fundamentales para el desarrollo de las habilidades sociales y de la cohesión en las comunidades, así como la disminución del estrés, lo cual, fue dejado en evidencia con el confinamiento relacionado con la pandemia COVID-19 y con las consecuencias no deseadas de la influencia de las redes sociales digitales (Lee & Tan, 2023); por ende, cada vez son más los llamados a que los proyectos VIS contemplen en su planeación áreas verdes adecuadas (Moreira Macías *et al.* 2019; Ziyari *et al.* 2019).

Además del confort térmico y la creación de las áreas verdes, el 25 % de los encuestados consideran que estas áreas contribuyen a la economía de las personas del sector, ya que pueden ser usados como lugares para el expendio de alimentos, productos o servicios de manera informal o formal, que son fundamentales para los ingresos de los sectores socioeconómicos 1-3, ampliamente afectados por la situación económica del país (King & Shackleton, 2020). Este efecto poco ha sido considerado en las investigaciones que exploran el valor de las áreas verdes urbanas.

Como conclusión las características de las coberturas las áreas verdes en los proyectos VIS estudiados son deficientes para la oferta de servicios ecosistémicos importantes, como el soporte a la biodiversidad, confort térmico o el generar espacios para la recreación activa y pasiva, así como de tejido social para la comunidad adyacente. Este escenario, obedece a que priman los intereses económicos sobre el bienestar social y hay serios vacíos de planeación territorial, como lo indican Kholodilin *et al.* (2024), sobre la historia de los procesos de VIS. A su vez, es de alta importancia que los tomadores de decisión en la política de VIS reconsideren sus criterios económicos de ordenamiento e incluyan la oferta de servicios ecosistémicos y el bienestar ambiental, como elementos de contexto, tal como se evidencia en el presente estudio.

Como perspectivas la gentrificación de las áreas periurbanas y rurales para el establecimiento de condominios y de parcelaciones orientadas a los estratos socioeconómicos 5 y 6 y al turismo, como segundas viviendas, puede influir en la reducción de áreas edificables para nuevos proyectos VIS, por la elevación artificial del costo de la tierra, por lo cual, será necesario investigar cómo estos tipos de proyectos inmobiliarios influyen en la dinámica del paisaje, la oferta de servicios ecosistémicos y la percepción del medio ambiente sano.

Agradecimientos. A la auxiliar de campo Johana Palacios Jiménez, por su colaboración en el registro fotográfico y la realización de encuestas. Los autores agradecen también a los habitantes de los proyectos VIS que participaron en la investigación. Conflictos de interés: El manuscrito fue preparado y revisado con la participación de todos los autores, quienes declaramos que no existe ningún conflicto de intereses que ponga en riesgo la validez de los resultados presentados. Financiación: Este artículo fue financiado con recursos propios. Contribución de los autores: Martha Lucia Ortiz-Moreno: Conceptualización, Investigación, Escritura y borrador original; Clara Inés Caro-Caro: Escritura y revisión y edición.

REFERENCIAS

- ALFONSO R., Ó.A. 2019. Arreglos neocorporatistas en la política habitacional. Un análisis de los Macroproyectos de Interés Social Nacional en Colombia. *Territorios*. 40:171-199. <https://doi.org/10.12804/revistas.urosario.edu.co/territorios/a.6449>
- ARBELÁEZ, M.A.; CAMACHO, C.; FAJARDO-GONZALEZ, J. 2011. Low-income housing finance in Colombia. IDB Working Paper No. IDB-WP-256:1-47. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.1946141>
- ARELLANA, J.; OVIEDO, D.; GUZMAN, L.A.; ALVAREZ, V. 2021. Urban transport planning and access inequalities: A tale of two Colombian cities. *Research in Transportation Business & Management*. 40:100554. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2020.100554>
- BOLOGNESI, M.; PILGRAM, R.; VAN DEN HEERIK, R. 2017. Reliability in content analysis: The case of semantic feature norms classification. *Behavior Research Methods*. 49:1984-2001. <https://doi.org/10.3758/s13428-016-0838-6>
- BYSTRIAKOVA, N.; TOVAR, C.; MONRO, A.; MOAT, J.; HENDRIGO, P.; CARRETERO, J.; TORRES-MORALES, G.; DIAZGRANADOS, M. 2021. Colombia's bioregions as a source of useful plants. *PLoS ONE*. 16(8):e0256457. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0256457>
- CASTRO-ARGUELLO, G.S.; CRUZ-FERNANDEZ, J.; ORTIZ-MORENO, M.L. 2020. Flora vascular y vivienda de interés social en Villavicencio: conflictos con la conservación de la biodiversidad. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*. 11(1):65-76. <https://doi.org/10.22490/21456453.2718>
- CHAKWIZIRA, J. 2019. Low-Income Housing Backlogs and Deficits "Blues" in South Africa. What Solutions Can a Lean Construction Approach Proffer? *Journal of Settlements & Spatial Planning*. 10(2):71-88. <https://doi.org/10.24193/JSSP2019.2.01>
- CONCEJO MUNICIPAL DE VILLAVICENCIO. 2015a. Acuerdo No 287 del 2015. Por medio del cual se adopta el nuevo Plan de Ordenamiento Territorial del municipio de Villavicencio y se dictan otras disposiciones. Concejo Municipal de Villavicencio. 381p. Disponible desde Internet en: https://www.curaduriasegundavillavicencio.com.co/normatividad/municipal/POT_2015_Acuerdo%20287%20de%202015.pdf
- CONCEJO MUNICIPAL DE VILLAVICENCIO. 2015b. Significativamente avanza proyecto habitacional Betty Camacho de Rangel en el Trece de Mayo. Boletín de prensa 412 de la Alcaldía de Villavicencio del 27-05-2015. Disponible desde Internet en: <https://historico.villavicencio.gov.co/Transparencia/BancoDocumentos/BOLETINES%20DE%20PRENSA/Vigencia%202015/Mayo/BOLETIN%20412%20DEL%20GOBIERNO%20DE%20LA%20CIUDAD%202015.pdf>
- DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO NACIONAL DE ESTADÍSTICA, DANE. 2021. La información del DANE en la toma de decisiones regionales. Villavicencio - Meta. Disponible desde Internet en: <https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/planes-departamentos-ciudades/210310-InfoDane-Villavicencio-Meta.pdf>

- DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN, DNP. 2019. Atlas de la aglomeración de Villavicencio. Disponible desde Internet en: https://osc.dnp.gov.co/administrator/components/com_publicaciones/uploads/Atlas_de_la_aglomeracin_de_Villavicencio.pdf
- DONOSO GOMEZ, R.E. 2018. Affordable condominium housing: A comparative analysis of low-income homeownership in Colombia and Ecuador. *A+BE | Architecture and the Built Environment*. 298p. <https://doi.org/10.7480/abe.2018.23.2605>
- FEW, R.; RAMÍREZ, V.; ARMIJOS, M.; HERNÁNDEZ, L.; MARSH, H. 2021. Moving with risk: Forced displacement and vulnerability to hazards in Colombia. *World Development*. 144:105482. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2021.105482>
- GBIF. 2023. GBIF Biodiversity Occurrence Download. <https://doi.org/10.15468/dl.6wyvzj>
- GIRALDO-OSPINA, T.; VÁSQUEZ-VARELA, L. 2021. Distribución e indicadores de cobertura y accesibilidad del espacio público en Manizales, Colombia. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*. 30(1):158-177. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v30n1.84320>
- HERNÁNDEZ-PULGARIN, G.; GARCIA-ARIAS, M.; RIVERA-PABON, J. 2020. Análisis de los ajustes normativos y urbanísticos de un Macroproyecto de Interés Social Nacional en la ciudad de Manizales, Colombia. *Revista Espacios*. 41(49):1-14. <http://dx.doi.org/10.48082/espacios-a20v41n49p01>
- INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN DE RECURSOS BIOLÓGICOS ALEXANDER VON HUMBOLDT, IAVH. 2021. BiodiverCiudades al 2030. Una apuesta por transformar ciudades desde la naturaleza. Disponible desde Internet en: <https://www.humboldt.org.co/noticias/biodiverciudades-al-2030-una-apuesta-por-transformar-ciudades-desde-la-naturaleza>
- ISMAIL, A.; MOHIDIN, H.; DAUD, M. 2017. A review on occupants' satisfaction and wellness level in low-cost housing in Malaysia. *Planning Malaysia*. 15:147-158. Disponible desde Internet en: <https://planningmalaysia.org/index.php/pmj/article/download/305/259>
- JUNG, M. 2016. LecoS—A python plugin for automated landscape ecology analysis. *Ecological informatics*. 31:18-21. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2015.11.006>
- KATTAN, G.; FRANCO, P.; ROJAS, V.; MORALES, G. 2004. Biological diversification in a complex region: A spatial analysis of faunistic diversity and biogeography of the Andes of Colombia. *Journal of Biogeography*. 31(11):1829-1839. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2004.01109.x>
- KHOLODILIN, K.; KOHL, S.; MÜLLER, F. 2024. The rise and fall of social housing? Housing de commodification in long-run comparison. *Journal of Social Policy*. 53(4):970-996. <https://doi.org/10.1017/S0047279422000770>
- KING, A.; SHACKLETON, C.M. 2020. Maintenance of public and private urban green infrastructure provides significant employment in Eastern Cape towns, South Africa. *Urban Forestry & Urban Greening*. 54:126740. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126740>
- LEE, H. 2016. Household Characteristics and Housing Deficits of Low-Income Renter Households in Housing Poverty: Focused on the 2014 Korea Housing Survey. *Family and environment research*. 54(2):155-164. <https://doi.org/10.6115/FER.2016.013>
- LEE, J.H.; TAN, T. 2023. Neighborhood walkability or third places? Determinants of social support and loneliness among older adults. *Journal of Planning Education and Research*. 43(2):240-253. <https://doi.org/10.1177/0739456X19870295>
- LOMBARD, M.; HERNANDEZ-GARCIA, J.; LOPEZ ANGULO, A. 2021. Informal rental housing in Colombia: an essential option for low-income households. *International Development Planning Review*. 43(2):257-277. <https://doi.org/10.3828/idpr.2020.6>
- LÓPEZ LÓPEZ, W.; BOCAREJO, M.; PERALTA, D. 2017. Mapping Colombian Citizens' Views Regarding Ordinary Corruption: Threat, Bribery, and the Illicit Sharing of Confidential Information. *Social Indicators Research*. 133:259-273. <https://doi.org/10.1007/s11205-016-1366-6>
- LOZANO SERNA, S.; PATIÑO-GALINDO, I.; GÓMEZ-CABRERA, A.; TORRES, A. 2018. Identifying Factors Causing Delays and Cost Overruns in Construction Projects in Colombia. *Ingeniería Y Ciencia*. 14(27):117-151. <https://doi.org/10.17230/ingciencia.14.27.6>
- MAO, Q.; HU, C.; GUO, Q.; LI, Y.; LIU, M. 2023. How does vegetation landscape structure of urban green spaces affect cultural ecosystem services at multiscale: Based on PLS-SEM Model. *Forests*. 14(7):1401. <https://doi.org/10.3390/f14071401>
- MATSUYUKI, M.; OKAMI, S.; NAKAMURA, F.; SARMIENTO-ORDOSGOITIA, I. 2020. Impact of aerial cable car in low-income area in Medellín, Colombia. *Transportation Research Procedia*. 48:3264-3282. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.08.150>
- MOREIRA MACÍAS, E.L.; LOOR-CHEVE, J.N.; TOALA-ZAMBRANO, M. 2019. Construcciones sostenibles: materiales ecológicos en viviendas de interés social (VIS)

- Como aporte al hábitat urbano. Diseño, Arte y Arquitectura. (7):67-81. <https://doi.org/10.33324/daya.v1i7.248>
- MWALUSEPO, S.; MULI, E.; FAKI, A.; RAINA, S. 2017. Land use and land cover data changes in Indian Ocean Islands: case study of Unguja in Zanzibar Island. Data in brief. 11:117-121. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2017.01.010>
- NJOROGE, J.B.; NDANG'ANG'A, P.K.; NATUHARA, Y. 2014. The pattern of distribution and diversity of avifauna over an urbanizing tropical landscape. Urban ecosystems. 17:61-75. <https://doi.org/10.1007/s11252-013-0296-1>
- OCHOA AMAYA, J.M.; CELY VELÁSQUEZ, R.D.; PEÑA ULLOA, L. 2021. Conflictos socioambientales en las microcuencas de Villavicencio 1980-2015. Revista Boletín Redipe. 10(8):397-409. <https://doi.org/10.36260/rbr.v10i8.1414>
- ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD, OPS. 2024. Determinantes ambientales de salud. Organización Panamericana de la Salud. Disponible desde Internet en: <https://www.paho.org/es/temas/determinantes-ambientales-salud>
- ORLANDI, F.; FORNACIARI, M.; RANFA, A.; PROIETTI, C.; RUGA, L.; MELONI G.; VENTURA, F. 2022. LIFE-CLIVUT, ecosystem benefits of urban green areas: a pilot case study in Perugia (Italy). iForest-Biogeosciences and Forestry. 15(2):133. <https://doi.org/10.3832/for3908-015>
- PADILLA-POZO, Á.; BARTUMEUS, F.; MONTALVO, T.; SANPERA-CALBET, I.; VALSECCHI, A.; PALMER, J. 2024. Assessing and correcting neighborhood socioeconomic spatial sampling biases in citizen science mosquito data collection. Scientific Reports. 14(1):22462. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-73416-6>
- PERDIGONES, A.; MAZARRÓN, F.R.; GARCÍA J.L. 2023. Green areas to introduce sustainability and social responsibility: Training on agenda 2030. En: Sart, G. Considerations on education for economic, social, and environmental sustainability IGI Global. Estados Unidos. p.156-175. <https://doi.org/10.4018/978-1-6684-8356-5.ch008>
- POTGIETER, L.; GAERTNER, M.; KUEFFER, C.; LARSON, B.; LIVINGSTONE, S.; O'FARRELL, P.; RICHARDSON, D. 2017. Alien plants as mediators of ecosystem services and disservices in urban systems: a global review. Biological Invasions. 19:3571-3588. <https://doi.org/10.1007/s10530-017-1589-8>
- QGIS. 2021. Changelog for QGIS 3.18. Disponible desde Internet en: <https://qgis.org/project/visual-changelogs/visualchangelog318/>
- RAMOS JARABA, S.M.; QUICENO TORO, N.; OCHOA SIERRA, M.; RUIZ SÁNCHEZ, L.; GARCÍA JIMÉNEZ, M.A.; SALAZAR-BARRIENTOS, M.Y.; GARCÉS-PALACIO, I.C. 2020. Health in conflict and post-conflict settings: reproductive, maternal and child health in Colombia. Conflict and health. 14:33. <https://doi.org/10.1186/s13031-020-00273-1>
- RODRÍGUEZ-ZAPATA, M.A.; RUIZ-AGUDELO, C. 2021. Environmental liabilities in Colombia: A critical review of current status and challenges for a megadiverse country. Environmental Challenges. 5:100377. <https://doi.org/10.1016/J.ENVC.2021.100377>
- SALVI DEL PERO, A.; ADEMA, W.; FERRARO, V.; FREY, V. 2016. Policies to promote access to good-quality affordable housing in OECD countries. OECD Social, Employment and Migration Working Papers, No.176, OECD Publishing. Francia. 82p. <https://doi.org/10.1787/5jm3p5gl4djd-en>
- SANJINÉS, D.; QUIÑÓNEZ, N. 2022. Housing and reincorporation strategies in post-conflict Colombia: Mismatch of micro-level visions and macro-scale approaches, Radical Housing Journal. 4(2):203-209. <https://doi.org/10.54825/VNCY2498>
- SMIRNOVA, L.; MERGEN, P.; GROOM, Q.; DE WEVER, A.; PENEV, L.; STOEV, P.; PE'ER, I.; RUNNEL, V.; CAMACHO, A.; VINCENT, T.; AGOSTI, D.; ARVANITIDIS, C.; BONET, F.; SAARENMAA, H. 2016. Data sharing tools adopted by the European Biodiversity Observation Network Project. Research Ideas and Outcomes. 2:e9390. <https://doi.org/10.3897/rio.2.e9390>
- SMITH, H.; MEDERO, G.M.; CRANE DE NARVÁEZ, S.; CASTRO MERA, W. 2023. Exploring the relevance of 'smart city' approaches to low-income communities in Medellín, Colombia. GeoJournal. 88(1):17-38. <https://doi.org/10.1007/s10708-022-10574-y>
- SUÁREZ-CASTRO, A.F.; MARON, M.; MITCHELL, M.G.; RHODES J.R. 2022. Disentangling direct and indirect effects of landscape structure on urban bird richness and functional diversity. Ecological Applications. 32(8):e2713. <https://doi.org/10.1002/eap.2713>
- SULLIVAN, E.; WARD, P.M. 2012. Sustainable housing applications and policies for low-income self-build and housing rehab. Habitat International. 36(2):312-323. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2011.10.009>
- SWENSEN, G.; BERG, S.K. 2020. The 'garden city' in the green infrastructure of the future: Learning from the past. Landscape Research. 45(7):802-818. <https://doi.org/10.1080/01426397.2020.1798365>

- TORRES RAMÍREZ, J.E.; PÉREZ PÉREZ, E. 2007. Caracterización del mercado de arrendamientos urbano para el segmento de la población de bajos ingresos. *Revista INVI*. 23(63):53-87.
- TUNISON, S. 2023. Content Analysis. En: Okoko, J.M.; Tunison, S.; Walker, K.D. *Varieties of qualitative research methods*. Springer Texts in Education. Springer. Cham. Estados Unidos. p.85-90. https://doi.org/10.1007/978-3-031-04394-9_14
- URIBE TAMI, M.F. 2019. Vivienda digna en las políticas públicas en Colombia. *Territorios en Formación*. (15):06-24. <https://doi.org/10.20868/tef.2019.15.3984>
- VARÓN GUTIÉRREZ, S.D.; VARGAS CUERVO, G. 2019. Análisis de la susceptibilidad por inundaciones asociadas a la dinámica fluvial del río Guatiquía en la ciudad de Villavicencio, Colombia. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*. 28(1):152-174. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v28n1.70856>
- WAHAB, A.; JASSIM, M.A. 2023. Optimization of the urban green area in Erbil territory for sustainable development. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*. 11(3):203-216.
- WAINER, L.S.; VALE, L.J. 2021. Wealthier-but-poorer: The complex sociology of homeownership at peripheral housing in Cartagena, Colombia. *Habitat International*. 114:102388. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2021.102388>
- WINTER, S.; GOLDMAN ROSAS, L.; PADILLA ROMERO, P.; SHEATS, J.; BUMAN, M.; BAKER, C.; KING, A. 2016. Using citizen scientists to gather, analyze, and disseminate information about neighborhood features that affect active living. *Journal of immigrant and minority health*. 18:1126-1138. <https://doi.org/10.1007/s10903-015-0241-x>
- YUNDA, J.G.; CEBALLOS-RAMOS, O.; RINCÓN-CASTELLANOS, M. 2022. The challenge of low-income housing quality in Latin American cities: lessons from two decades of housing policies in Bogotá. *Housing Studies*. 37(10):1877-1895. <https://doi.org/10.1080/02673037.2020.1867080>
- ZIN, H.M.; BAKAR A.A.; AZLAN A. 2023. The importance of neighbourhood parks in enhancing the mental and physical well-being of low-cost housing residents in the aftermath of the COVID-19 pandemic. *MAJ-Malaysia Architectural Journal*. 5(2):51-64.
- ZIYARI, K.; NEZAMI, M.; POURAHMAD, A. 2019. Explanation of the role of the third places in the socialization of urban districts (case study: Urban open-air cafes in Tehran, district 2). *Quarterly Journals of Urban and Regional Development Planning*. 4(8):35-74. <https://doi.org/10.22054/urdp.2020.55428.1251>

La visión desde ninguna parte: páramos y desarrollo sostenible

The view from nowhere: Paramos and sustainable development

Diana María Acevedo-Zapata^{1,2} 

¹Universidad Pedagógica Nacional de Colombia, Departamento de Ciencias Sociales, Licenciatura en Filosofía. Bogotá D.C., Colombia; e-mail: dmacevedoz@pedagogica.edu.co

²Universidad del Cauca, Departamento de Biología, Doctorado en Etnobiología y Estudios Bioculturales.

Cómo citar: Acevedo-Zapata, D.M. 2025. La visión desde ninguna parte: páramos y desarrollo sostenible. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 28(1):e2652. <http://doi.org/10.31910/rudca.v28.n1.2025.2652>

Artículo de acceso abierto publicado por Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, bajo una Licencia Creative Commons CC BY-NC 4.0

Publicación oficial de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Institución de Educación Superior Acreditada en Alta Calidad por el Ministerio de Educación Nacional

Recibido: mayo 6 de 2024

Aceptado: junio 12 de 2025

Editado por: Helber Adrián Arévalo Maldonado

RESUMEN

Los páramos están en la agenda de la legislación ambiental desde mediados del siglo XX en Colombia, por esta razón, se puede decir que son ecosistemas pioneros en conservación. La agenda ambiental de la conservación de los páramos es parte de la estrategia para alcanzar los objetivos de desarrollo de la nación colombiana. En la formulación de las políticas públicas y las leyes relativas a los páramos, recientemente, se señala la necesidad de una perspectiva integradora y holística que los reconoce como etnosocioecosistemas, debido a que son territorios históricamente habitados, vividos y representados por diversas comunidades humanas. A partir de un análisis de la normatividad ambiental sobre páramos en Colombia y a través de una metodología hermenéutico-fenomenológica, se rastreó la concepción de desarrollo y desarrollo sostenible, utilizada para definir y tomar decisiones sobre los ecosistemas de páramo en el país. Estas nociones se discuten a partir de los estudios del desarrollo, particularmente los latinoamericanos y la epistemología situada de Donna Haraway. Esto tiene el propósito de mostrar que la actual comprensión del desarrollo sostenible falla en integrar y reconocer, de manera adecuada, la pluralidad de visiones sobre el páramo. En este contexto, se muestra la importancia de fomentar encuentros y diálogos de perspectivas que se reconocen como parciales, es decir, situadas sociohistóricamente y atravesadas por relaciones de poder.

Palabras clave: Conocimientos situados; Conservación ambiental; Ecosistemas de alta montaña; Epistemología feminista; Etnosocioecosistemas.

ABSTRACT

The paramos have been on the agenda of environmental legislation of Colombia since the middle of the 20th century; for this reason, it can be said that they are pioneer ecosystems in conservation. The environmental agenda of paramos conservation is part of the strategy to achieve the development objectives of Colombia. In the formulation of public policies and laws related to the paramos, recently, the need for an integrative and holistic perspective that recognizes them as ethno-socio-ecosystems has been pointed out, since they are territories historically inhabited, lived in, and represented by diverse human communities. Through an analysis of the environmental regulations on paramos in Colombia and a hermeneutic-phenomenological methodology, the concept of development and sustainable development used to define and make decisions about the country's paramos ecosystems was traced. These notions are discussed based on development studies, particularly Latin American ones, and the situated epistemology of Donna Haraway. This is intended to show that the current understanding of sustainable development fails to adequately integrate and recognize the plurality of visions on the paramo. In this context, it shows the importance of fostering encounters and dialogues of perspectives that are recognized as partial, in other words, situated socio-historically and crossed by power relations.

Keywords: Environmental conservation; Ethno-socio-ecosystems; Feminist epistemology; High Mountain ecosystems; Situated knowledges.

INTRODUCCIÓN

Los páramos están en la agenda de la legislación ambiental desde mediados del siglo XX en Colombia, desde la Ley segunda de 1959 (Congreso de Colombia, 1959), la declaración de Parques Nacionales Naturales en alta montaña, la Ley 1450 de 2011 (Congreso de Colombia, 2011) hasta la Ley 1930 de 2018 (Congreso de Colombia, 2018) y, por esto, se puede decir que son ecosistemas pioneros en materia de conservación. La agenda ambiental de la conservación de los páramos es parte de la estrategia para alcanzar los objetivos de desarrollo de la nación colombiana. Ejemplo de ello, es la Ley 1450 de 2011 (Congreso de Colombia, 2011), en la que se encuentra el mandato de delimitación de los páramos y que sanciona el Plan Nacional de Desarrollo 2010-2024, cuyo artículo primero incluye una alusión explícita al desarrollo.

En la formulación de las políticas públicas y las leyes relativas a los páramos ha cobrado fuerza una perspectiva integradora y holística que los reconoce como etnosocioecosistemas, debido a que son territorios históricamente habitados, vividos y representados por diversas comunidades humanas (Art. 2 Ley 1930 de 2018 (Congreso de Colombia, 2018). El componente social y cultural del páramo está vinculado con “la espiritualidad y la identidad de la población”, tanto para los pueblos indígenas de los Andes, como para las comunidades rurales y urbanas, pues existe una “apreciación espiritual” de la montaña; en términos culturales e identitarios, el páramo es apreciado en sus dimensiones espirituales, estéticas, investigativas, educativas y recreativas (Hofstede, 2013).

El reconocimiento de los páramos como etnosocioecosistemas está enmarcado dentro de la normatividad ambiental de la Nación y su noción de desarrollo. La perspectiva integradora y holística de la normatividad reciente debería implicar el reconocimiento de una pluralidad de visiones del páramo (culturales, espirituales,

epistémicas, estéticas y otros); sin embargo, surge la pregunta de qué significa realmente integrarlas y reconocerlas.

El propósito de este artículo de reflexión es mostrar que el encuentro de la pluralidad de visiones del páramo solo se puede dar si el paradigma del desarrollo y del desarrollo sostenible, entendidos como la única alternativa viable política y epistemológicamente, puede ser puesta en cuestión. Siguiendo a Donna Haraway, se propone que un mejor conocimiento sobre el páramo no consiste en el planteamiento de un nuevo paradigma “más universal”, “más objetivo”, “más abarcante”, sino de proponer encuentros y diálogos de perspectivas que se reconocen como parciales, es decir, situadas socio-históricamente y atravesadas por relaciones de poder.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio se concentró en el análisis de las siguientes leyes, sancionadas por el Congreso de Colombia, que regulan el ordenamiento territorial (la delimitación, uso, manejo y prohibiciones) de los páramos: Ley 200 de 1936 (Congreso de Colombia, 1936), Ley segunda de 1959 (Congreso de Colombia, 1959), artículo 80 de la Constitución Política de Colombia (Asamblea Nacional Constituyente, 1991), Ley 99 de 1993 (Congreso de Colombia, 1993), Ley 1450 de 2011 (Congreso de Colombia, 2011), Ley 1930 de 2018 (Congreso de Colombia, 2018).

El análisis se llevó a cabo con las herramientas conceptuales y teóricas de los estudios críticos del desarrollo, particularmente, desde su versión latinoamericana. A partir de una metodología hermenéutica-fenomenológica, se argumenta la necesidad de un enfoque situado, entendido desde las categorías propuestas por Donna Haraway, para un abordaje integral y holístico en las discusiones y decisiones territoriales sobre los páramos colombianos (Tabla 1).

Tabla 1. Legislación sobre páramos revisada en el presente artículo.

Norma	Descripción
Ley 200 de 1936 (Congreso de Colombia, 1936)	Sobre el régimen de tierras
Ley Segunda de 1959 (Congreso de Colombia, 1959)	Sobre economía forestal de la nación y conservación de recursos naturales renovables
Constitución Política de Colombia (Asamblea Nacional Constituyente, 1991)	Artículo 80. Sobre el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución.
Ley 99 de 1993 (Congreso de Colombia, 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.
Ley 1450 de 2011 (Congreso de Colombia, 2011)	Por la cual se expide el Plan Nacional de Desarrollo, 2010-2014.
Ley 1930 de 2018 (Congreso de Colombia, 2018)	Por medio de la cual se dictan disposiciones para la gestión integral de los páramos en Colombia.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Colombia posee el 50 % del total de los páramos andinos, los cuales, son heterogéneos, debido a condiciones de altura, historia geológica, relieve, amplitud y extensión (REF) (Sarmiento & León, 2015). Esto determina variedades, a escala regional, en los patrones edáficos (tipos de suelos, por ejemplo, volcánicos o no volcánicos); climáticos (páramos húmedos que drenan al Amazonas y páramos secos en valles interandinos) y de transformación (según los usos, especialmente agropecuarios y mineros). A escala local, determina variedades en la exposición, pendiente y cercanía a cuerpos de agua, entre otros (Llambí & Cuesta, 2014). Adicionalmente, los páramos se diferencian con relación a la historia de ocupación y presencia humana, es decir, según las diferentes formas en que los seres humanos los habitan, sienten, viven y representan en lo largo de la historia. Los páramos son “sistemas socioecológicos que albergan una diversidad extraordinaria y juegan un papel clave en la prestación de servicios ecosistémicos, en particular en los de regulación y provisión hídrica a nivel nacional” (IAVH, 2017). Por ello, son ecosistemas estratégicos en Colombia y su conservación hace parte de la política ambiental de la nación (Congreso de Colombia, 2018).

Con la Ley 200 de 1936 (Congreso de Colombia, 1936) inicia la figura de áreas de reserva forestal en Colombia; luego, en la Ley segunda de 1959 (Congreso de Colombia, 1959), se crean siete grandes reservas forestales en el país y los primeros parques nacionales naturales, que incluyen zonas de alta montaña, como es el caso del Cocuy. Esta Ley establece “Zonas Forestales Protectoras” y “Bosques de Interés General” “para el desarrollo de la economía forestal y protección de los suelos, las aguas y la vida silvestre” (Artículo 1). El siguiente hito legal es la Constitución Política de Colombia de 1991, según el artículo 80 “el Estado planificará el manejo y el aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución. Además, deberá prevenir y controlar los factores de deterioro ambiental, imponer las sanciones legales y exigir la reparación de los daños causados” (Asamblea Nacional Constituyente, 1991).

Desde 1991, el desarrollo está vinculado con el aprovechamiento de los recursos naturales y este es, por tanto, el marco, desde el cual, se realiza el ordenamiento ambiental del territorio. Tal es el caso de la política ambiental colombiana, desde 1993, que se rige por el “proceso de desarrollo económico y social del país, según los principios universales y del desarrollo sostenible contenidos en la Declaración de Río de Janeiro de junio de 1992 sobre Medio Ambiente y Desarrollo” (Ley 99 de 1993, Artículo 1) (Congreso de Colombia, 1993). Ese mismo artículo estipula que “las zonas de páramos, subpáramos, los nacimientos de agua y las zonas de recarga de acuíferos serán objeto de protección especial”.

Lo anterior indica que el discurso de la conservación se articula desde el discurso del desarrollo, de modo que nos permite responder a la pregunta por los fines: el para qué de la conservación. La conservación de los páramos está al servicio del desarrollo económico y social del país, desde el enfoque de la sostenibilidad;

por lo anterior, no se conserva por conservar, no hay un valor intrínseco en los páramos, sino que es valioso para la sociedad por su capacidad de estar al servicio del bienestar humano, entendido desde la lógica del progreso y el desarrollo.

Algo semejante ocurre con la Ley 130 de 2018 (Congreso de Colombia, 2018), que tiene como objeto “establecer como ecosistemas estratégicos los páramos y fijar directrices que propendan por su integralidad, preservación, restauración, uso sostenible y generación de conocimiento” (Artículo 1). El artículo 3 define el páramo como un

“ecosistema de alta montaña, ubicado entre el límite superior del Bosque Andino y, si se da el caso, el límite inferior de los glaciares, en el cual dominan asociaciones vegetales tales como pajonales, frailejones, matorrales, prados y chuscales, además puede haber formaciones de bosques bajos y arbustos y presentar humedales como los ríos, quebradas, arroyos, turberas, pantanos, lagos y lagunas, entre otros”.

Como se puede notar, los enfoques naturalistas y las visiones biofísicas hacen parte del conocimiento autorizado para informar la toma de decisiones en materia legal sobre el territorio. Así, las áreas a conservar de la alta montaña se delimitaron con base en criterios técnico-científicos, pero esta delimitación tuvo efectos de orden social y político: “al propiciar cambios en las prácticas y ordenamientos espaciales precedentes, la delimitación modificó el entramado social asociado: en unos casos generó nuevas tensiones entre los actores que ya habitaban o se relacionaban con estos territorios, en otros exacerbó desencuentros precedentes” (Rodríguez, 2021); por esta razón, recientemente, se han incluido enfoques culturales y socioambientales.

El artículo 3 de la Ley 130 (Congreso de Colombia, 2018), también incluye la definición de “habitantes tradicionales de páramo”, esto es, “las personas que hayan nacido y/o habitado en las zonas de los municipios que hacen parte de las áreas delimitadas como ecosistemas de páramo y que en la actualidad desarrollen actividades económicas en el ecosistema”. Esta Ley reconoce los aspectos sociales y culturales de los páramos como un principio rector y adopta, de hecho, un enfoque ecosistémico e intercultural “que reconoce el conjunto de las relaciones socioculturales y procesos ecológicos que inciden en la conservación de la diversidad biológica, de captación, almacenamiento, recarga y regulación hídrica que garantiza los servicios ecosistémicos” (Artículo 2).

Tal como está escrito en la ley, el reconocimiento del enfoque intercultural y de las relaciones socioculturales y ecológicas está vinculado con la garantía de la provisión de servicios ecosistémicos de los páramos; en eso consiste la declaración de su rol estratégico para la Nación, su carácter de proveedor de este tipo de servicios. Así pues, si bien los enfoques naturalistas definen el páramo como un ecosistema, su función en la sociedad depende justamente de los beneficios que los páramos otorgan a las personas y que los insertan en sus sistemas jurídicos, económicos y políticos, pero, sobre todo, los páramos no son una exterioridad de la sociedad, un

paraíso natural prístino vulnerable a la intervención humana, sino que hacen parte de la vida social y sus construcciones antagónicas del mundo: están insertos en el campo en tensión de los valores y marcos de sentido que se disputa en la arena de lo político.

El enfoque inter y sociocultural está vinculado con lo que se denomina en la Ley 1930 (Congreso de Colombia, 2018), el enfoque diferencial, que se refiere al reconocimiento de los habitantes tradicionales de los páramos como personas que, en virtud de lo dispuesto en la ley en pro de la conservación de los páramos, quedan en condiciones especiales de afectación e indefensión; por consiguiente, requieren de atención y tratamiento preferencial y prioritario por parte del gobierno Nacional, para brindarles alternativas en el desarrollo del programa de reconversión y sustitución de sus actividades prohibidas (Artículo 3).

Esto último deja ver el conflicto que los marcos legales de prohibición de actividades productivas en zonas de conservación, como los páramos, han generado en las últimas décadas en el país (Salas-Barreto & Estupiñán-Cruz, 2025; Parra-Romero & Castillo-Estupiñán, 2023); por ejemplo, este tipo de conflictos provocó la creación de la Mesa Nacional de Páramos en Colombia (Usme, 9 de febrero de 2019). Si bien la conservación se entiende como orientada a garantizar la provisión de servicios ecosistémicos para el bienestar de la población, quienes habitan los páramos y adquieren de allí su sustento y forma de vida quedan “en condiciones especiales de indefensión y afectación”.

Los páramos son ecosistemas estratégicos porque ofrecen servicios ecosistémicos. Se conserva la diversidad biológica, la captación, el almacenamiento, la recarga y la regulación hídrica, como formas de garantizar la prestación de esos servicios, orientada al bienestar de la población que se beneficia; por ejemplo, con la provisión de agua, en detrimento de la afectación de quienes habitan los páramos por la restricción de las actividades productivas que les dan sustento. Por lo anterior, el estado funge como mediador para generar estrategias de compensación y de protección a las personas que habitan los páramos, bajo la idea de que ello produce un bien mayor para el desarrollo de la Nación.

Se puede decir que hay tres momentos en el discurso de la conservación y de la gestión de los páramos por parte del Estado colombiano. Primero, la Ley 2 de 1959 (Congreso de Colombia, 1959), con la declaratoria de Parques Nacionales Naturales y de Zonas Forestales Protectoras y de medidas de conservación para el desarrollo de la economía forestal. Segundo, la Constitución Política de Colombia de 1991 (Asamblea Nacional Constituyente, 1991) y la Ley 99 de 1993 (Congreso de Colombia, 1993), refieren a la conservación como parte del manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, desde el paradigma del desarrollo sostenible; este discurso se extiende hasta la ley 1450 de 2011 (Congreso de Colombia, 2011), en la que, desde este mismo marco, se hace el mandato de delimitación de los páramos. Tercero, desde la Ley 1930 de 2018 (Congreso de Colombia, 2018), se mantiene la visión del desarrollo sostenible, pero se incluye la perspectiva intercultural y socioambiental, con un enfoque diferencial, que

reconoce a las poblaciones que, tradicionalmente, han habitado el páramo. Aunque en cada momento la concepción y las políticas del desarrollo fueron diferentes –la complejidad de su historia hace imposible detenerse en esos cambios aquí–, es claro que el discurso del desarrollo ha estado presente desde los inicios de las políticas de conservación de los páramos en Colombia y continúa siendo, hoy en día, un referente.

El “desarrollo” se acuña políticamente de la mano del “subdesarrollo” y adquiere visibilidad y eficacia, después de la Segunda Guerra Mundial, con la toma de posesión del presidente Truman, en Estados Unidos, el 20 de enero de 1949:

Ese día, dos mil millones de personas se volvieron subdesarrolladas. En realidad, desde entonces dejaron de ser lo que eran, en toda su diversidad, y se convirtieron en un espejo invertido de la realidad de otros: un espejo que los desprecia y los envía al final de la cola, un espejo que reduce la definición de su identidad, la de una mayoría heterogénea y diversa, a los términos de una minoría pequeña y homogenizante (Esteve, 1996).

Este espejo invertido produce la imagen imposible: la de la carencia, la de aquello que falta, lo que no se tiene o no se es. Desde esa carencia se proyectó la identidad de dos tercios de la población mundial como pobres, atrasados, ignorantes, gentes inferiores, que deben aspirar a los ideales del otro lado del espejo, la abundancia, el progreso y su consiguiente superioridad. Esta metáfora es llamada por Escobar (2014) “un principio organizativo central de la vida social”, “sistema de representación” o “régimen de verdad”, por ser un “instrumento poderoso para normatizar el mundo”, es decir, por su capacidad para controlar y ordenar las relaciones sociales.

El desarrollo es heredero de la constelación semántica y política de la modernidad colonial. La noción de progreso depende de la tesis moderna y colonial de que solo hay una historia, así como hay solo una civilización, un solo modelo de humanidad, representado por Europa y el mundo anglosajón, al que se deben someter todos los pueblos, so pena de ser marcados por inferioridad racial, feminización, primitivismo, pobreza, ignorancia, enfermedad y atraso (Mohanty *et al.* 1991). La riqueza material, entendida bajo los estándares de Estados Unidos y Europa, se erige como modelo de progreso y proyecta sobre las comunidades humanas, que no se ajustan a sus estándares, la marca de una inferioridad que no es solo económica. Esta es la visión etnocéntrica, según la cual, Europa es el rasero de la única civilización: la creación de Europa que es al mismo tiempo la creación de sus “otros”, como es el caso, no solo de los territorios colonizados en las Américas y en África, sino también del mal llamado Oriente (Said, 1978). La fuerza semántica de la noción de desarrollo proviene no solo de la historia colonial asociada a la noción del progreso de la Historia, sino, también, de las metáforas biológicas sobre la forma cómo los organismos alcanzan sus estados acabados, cómo se realizan y completan. Basados en el lenguaje de Darwin y Wolff, el desarrollo se aparejó con la noción de evolución, como la forma de encaminarse hacia la perfección (Esteve, 1996).

Pese a que el desarrollo es un concepto altamente complejo, sus principales premisas se articulan desde la noción de crecimiento económico, es decir, el corazón del desarrollo está comprometido con la acumulación de capital y la ampliación de los mercados (Escobar, 2014). La inversión de capital es central para que los países subdesarrollados salgan de la pobreza, en la medida en que supone que su inclusión total en las lógicas de la producción y acumulación de valor les dará el boleto de entrada al selecto grupo de los países ricos. Modernizar era, entonces, sinónimo de industrializar, urbanizar y poner a circular el capital y tenía importantes consecuencias en la valoración cultural y social de las poblaciones. Esto significa que la cultura está donde está la riqueza y el progreso material, de modo que los países pobres no solo están atrasados en materia económica, también, social y culturalmente. Desde allí, se articuló la retórica salvacionista que les otorgaba a los países ricos la misión de sacar a otros de la pobreza y el subdesarrollo. El sentido totalizante de este discurso niega la posibilidad de que existan otras formas de vida, otros criterios, raseros y estándares para organizar la vida y la búsqueda del bienestar.

Aunque el discurso del desarrollado se ha transformado profundamente desde sus inicios alrededor de 1949, se ha mantenido en el tiempo su contenido semántico básico, asociado al mejoramiento continuo y la evolución, de fuertes raíces racistas, patriarcales y coloniales, así como su compromiso con el crecimiento económico, de fuerte raigambre capitalista. Por razones de espacio, no se amplía la compleja historia del concepto y las políticas del desarrollo en los últimos 70 años; para el propósito de este trabajo, se expondrá la noción más reciente de desarrollo sostenible, dado que está presente desde 1991 y sigue vigente en los enfoques diferenciales, interculturales y socioambientales de la legislación más reciente sobre los páramos.

Antes de entrar a la noción de desarrollo sostenible es necesario detenerse a considerar el rol que el neoextractivismo ha tenido en el regreso de “una visión productivista del desarrollo” en Latinoamérica, en las últimas dos décadas. Para Svampa (2019), el neoextractivismo contemporáneo puede ser caracterizado como un modelo de desarrollo basado en la sobreexplotación de bienes naturales, cada vez más escasos, en gran parte no renovables, así como en la expansión de las fronteras de la explotación hacia territorios antes considerados como improductivos, desde el punto de vista del capital. El mismo, se caracteriza por la orientación a “la exportación de bienes primarios a gran escala, entre ellos hidrocarburos (gas y petróleo), metales y minerales (cobre, oro, plata, estaño, bauxita, zinc, entre otros), así como productos ligados al nuevo paradigma agrario (soja, palma africana, caña de azúcar)”.

Lo que Svampa (2019) llama el giro ecoterritorial es una respuesta a la forma como el extractivismo acapara la tierra por medio de lógicas de desposesión y megaproyectos intensivos en capital y no en trabajo. El extractivismo hace parte de la historia colonial de Latinoamérica, según la cual, los territorios colonizados eran grandes despensas de recursos, entendidos como ilimitados, una naturaleza exuberante y rica al servicio de los imperios. Para Machado Araóz (2013), esa “diferenciación-jerarquización originaria entre

territorios coloniales y metrópolis imperiales; los unos pensados como meros espacios de saqueo y expolio para el aprovisionamiento de los otros” es un “rasgo estructural del capitalismo como sistema-mundo”. Por eso, para Svampa (2019), el neoextractivismo es una ventana privilegiada para entender la acumulación contemporánea y la aceleración del metabolismo del capital, esto es el aumento acelerado de la demanda de materias primas y energías, para entender la crisis del proyecto de la modernidad y la actual crisis socioecológica, los cuestionamientos a las actuales dinámicas del desarrollo, entre otros puntos centrales de la geopolítica y la economía globales. La presión que ejerce este sistema sobre la naturaleza genera violencia, despojo, aniquilación y explotación de territorios, naturalezas, comunidades, vivientes y personas, en suma, despierta un escenario de conflictividad: la represión y las formas autoritarias y beligerantes del ejercicio del poder por parte de las instituciones estatales y las empresas multinacionales ante la resistencia y las luchas por la defensa de la tierra de diferentes movimientos y actores sociales. La situación de Latinoamérica, en las últimas dos décadas, con relación al discurso del desarrollo, pasa por el fortalecimiento del neoextractivismo, como única salida para alcanzar el progreso de las naciones, el crecimiento económico, la superación de la pobreza, tanto bajo gobiernos progresistas como conservadores.

El antropocentrismo es una de las principales características del discurso y las políticas del desarrollo, a nivel global. Según la Declaración de Estocolmo (ONU, 1972) “de todas las cosas del mundo los seres humanos son los más valiosos” (Principio 5) y según la Declaración sobre el derecho al desarrollo (ONU, 1986) “La persona humana es el sujeto central del desarrollo y debe ser el participante activo y el beneficiario del derecho al desarrollo” (Artículo 2). En los instrumentos del derecho internacional relativos al ambiente y al desarrollo ha predominado un enfoque que “tiene a la naturaleza como un elemento netamente instrumental –y la valora en tanto su cuidado no interfiera con el derrotero de crecimiento económico” (Murcia, 2012).

Así, el desarrollo no es solo un discurso que replica los sistemas coloniales en el ordenamiento mundial del poder, bajo una mirada eurocéntrica, sino que, además, su constelación semántica y política está vinculada con el antropocentrismo y, con este, al patriarcado (Plumwood, 2003; Shiva, 2005; Cabnal, 2010). Pues la inferiorización de la naturaleza es una forma de feminización que comparte su raíz con la inferiorización de las mujeres y el ensañamiento sobre sus cuerpos, subjetividades y discursos. Esto significa que la explotación de la naturaleza como algo al servicio del “hombre” está en continuidad con la explotación de los cuerpos de las mujeres y otras poblaciones y seres feminizados.

La Declaración de Río (ONU, 1992) matiza el antropocentrismo, al incluir la “armonía con la naturaleza”, como parte del derecho de los seres humanos a una vida saludable y productiva (Principio 1). Así, esta declaración “introduce la otredad de la naturaleza en el campo de la ponderación del impacto de las actividades humanas” (Murcia, 2012). La armonía con la naturaleza emerge como tema por la preocupación por las generaciones futuras en los conceptos

y resoluciones emitidas por la Asamblea General de las Naciones Unidas. A esto, se le ha llamado el principio intergeneracional para la protección del medio ambiente y fundamenta el concepto de desarrollo sostenible, sobre la idea de que es posible que el crecimiento económico no sacrifique la posibilidad de que las generaciones futuras tengan acceso también a los beneficios de la producción y el crecimiento. Según el informe de la ONU (1987), el desarrollo sostenible busca satisfacer las necesidades y aspiraciones del presente, sin comprometer la capacidad de satisfacerlos en el futuro. Lejos de buscar el cese del crecimiento económico, reconoce que los problemas de pobreza y el subdesarrollo no pueden ser solucionados, a menos que tengamos una nueva era de crecimiento, en la cual, los países en desarrollo juegan un rol importante.

De esta forma, se puede notar cómo el desarrollo sostenible no compromete el crecimiento económico. Al contrario, se trata de una visión que sigue poniendo el progreso material en el centro de las aspiraciones y necesidades y las proyecta sobre una misma temporalidad, es decir, establece continuidad y permanencia de estas aspiraciones desde el presente hacia el futuro. La principal cuestión y, hoy por hoy, su respuesta clara y contundente, es que “no es posible el crecimiento indefinido dentro de una biósfera limitada” (Murcia, 2012). El proyecto del crecimiento sostenido e ilimitado ha traído como consecuencia la devastación ambiental y social, la sobreexplotación de poblaciones humanas y más que humanas, la destrucción de los ecosistemas, las culturas y naturalezas. La erosión de la diversidad por cuenta de la forma cómo el discurso y la política del desarrollo ha ordenado la vida en el planeta alcanza tanto la diversidad biológica, como la diversidad cultural (Maffi, 2014). De allí que el concepto de biocultura y diversidad biocultural estén orientados a mostrar cómo la vida en el planeta es un entramado complejo y diverso en el que no se pueden separar naturaleza y cultura.

El discurso del desarrollo sostenible pretende hacer compatible una visión instrumental de la naturaleza, según la cual, la naturaleza está al servicio del “hombre”, con una visión que evita que los impactos de la explotación no aniquilen las posibilidades de continuar explotando en el futuro (Gudynas, 2004). La naturaleza es concebida como una canasta de recursos, como la condición de posibilidad del crecimiento, que será sacrificada en la medida en que permita llevar a cabo los fines superiores que una porción de la población humana proyecta como los fines de toda la humanidad. De este modo, no se conserva a la naturaleza porque tenga un valor en sí mismo, sino por su valor utilitario dentro de esta visión hegemónica del mundo.

Haraway (1995), en un gesto de provocación, reivindica la metáfora de la visión para reivindicar con ella la parcialidad. La visión ha sido tradicionalmente la metáfora de la mirada distante y objetualizante de la ciencia eurocéntrica. La humanidad (el Hombre) en su sentido hegemónico es androcéntrica, colonial y militarista, sus sesgos y compromisos están de la mano de una noción de la visión desde ninguna parte, un ojo que mira sin ser mirado, un punto de vista privilegiado que no reconoce sus privilegios y no se reconoce como un punto de vista, entre muchos otros:

Se enfatiza en la naturaleza encarnada de la vista para proclamar que el sistema sensorial ha sido utilizado para significar un salto fuera del cuerpo marcado hacia una mirada conquistadora desde ninguna parte. Esta es la mirada que míticamente inscribe todos los cuerpos marcados, que fabrica la categoría no marcada que reclama el poder de ver y no ser vista, de representar y evitar la representación. Esa mirada significa las posiciones no marcadas de Hombre y de Blanco, uno de los muchos tonos obscenos del mundo de la “objetividad” a oídos feministas en las sociedades dominantes científicas y tecnológicas, postindustriales, militarizadas, racistas y masculinas (Haraway, 1995).

Ese gesto de divinidad, ese ponerse en el lugar de dios, de la visión no marcada, de la visión desde ninguna parte es el blanco de críticas de Haraway y de muchas otras feministas; pero su propósito es invertir o transgredir la metáfora visual, en lugar de ser una nueva hegemonía, se propone como un lugar de resistencia a esa mirada hegemónica. Por eso, le interesa notar que los ojos son situados, están encarnados, están en un cuerpo específico y esto vale, tanto para las mediaciones tecnológicas de la visión como para los ojos de todos los vivientes, es decir, los orgánicos y los inorgánicos. La situación es una forma de encuentro entre localidades y temporalidades específicas.

El problema no está en la parcialidad, el problema está en la constitución de hegemonías desde determinadas parcialidades y su articulación con los ejes de dominación. Haraway usa la mirada, pero se refiere a la condición de todo sentido: la sensorialidad misma nos conecta no solo con el cuerpo, sino con el lugar, con el tiempo, con el carácter situado de nuestra propia experiencia y de toda experiencia. Entonces, la confusión está en creer que debemos salir de nuestra condición humana para acceder a la naturaleza, a la esencia del páramo, a la esencia de la vida no humana, o más que humana. De lo que debemos prescindir es de la mirada reduccionista, según la cual, lo humano es el único rasero, esa misma mirada que concibe la humanidad desde el sesgo antropocéntrico, la mirada de gesto divino, la mirada sin cuerpo, sin órganos (incluso, si está mediada tecnológicamente). La parcialidad es la oportunidad para el diálogo y para el encuentro, para tejidos, redes, marañas de todo tipo: para el reconocimiento de la multiplicidad de la vida, de los vivientes, de seres y fuerzas de la naturaleza.

Retomando los efectos del discurso y las políticas del desarrollo sostenible sobre el ordenamiento de la relación páramos – sociedad en Colombia, desde el marco normativo de la política ambiental sobre la alta montaña. El desarrollo de la economía forestal, el desarrollo económico, el crecimiento sostenido y el progreso han sido invocados a lo largo de la historia de la gestión estatal del páramo hasta el presente; sin embargo, desde la Constitución Política de Colombia de 1991 (Asamblea Nacional Constituyente, 1991) y la Ley 99 de 1993 (Congreso de Colombia, 1993) hasta la ley 1930 de 2018 (Congreso de Colombia, 2018), se ha invocado sistemáticamente el modelo del desarrollo sostenible como marco amplio para la gestión y conservación del páramo. ¿Qué visiones del páramo permite esa articulación entre conservación y discurso del desarrollo? ¿Qué visiones del páramo hace imposibles, relega, niega o invisibiliza? O, en otras palabras, desde la amalgama conservación

y desarrollo sostenible, ¿cuáles formas de ser y pensar los páramos son permisibles?

El reciente paradigma intercultural y socioambiental en la gestión y conservación parece reconocer que hay distintas visiones sobre el páramo y que pueden estar en conflicto o tensión; por ejemplo, la introducción de perspectivas, como la gestión integral del páramo, los enfoques socio ecológicos, la historia ambiental, los sistemas de producción rural y los servicios ecosistémicos, apuntan al reconocimiento de que los páramos son territorios de vida, entramados complejos, en los que sistemas culturales y biológicos están intrínsecamente ligados, lugares habitados por múltiples comunidades, que dependen espiritual, material y simbólicamente de los territorios de altura (Ungar, 2015). Estos son lenguajes que el Instituto de Investigaciones en Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt - IAVH acuñó, sobre todo, en la última década, en documentos técnicos y publicaciones, que responden y contribuyen a la implementación de la política pública y el ordenamiento ambiental de la alta montaña en el país (IAVH, 2017); por ejemplo, el Instituto respondió ante el mandato de delimitación con documentos e insumos técnicos, respondió también al mandato de involucrar a las comunidades y proponer estrategias para la resolución de los conflictos socioambientales, producidos por las políticas de la conservación y las prohibiciones de actividades productivas en el páramo.

La noción de conflicto socioambiental se utiliza para explicar las tensiones generadas por la degradación o impacto negativo sobre los recursos naturales por cuenta de la intervención antrópica, los valores ambientalistas y de conservación y los valores sociales y el sustento material de las comunidades (Ungar *et al.* 2019). Svampa (2019) entiende los conflictos socioambientales, como

[...] “aquellos ligados al acceso y control de los bienes naturales y del territorio, que suponen por parte de los actores enfrentados intereses y valores divergentes en torno de estos, en un contexto de gran asimetría de poder”. Esta noción sirve para entender lo que ha estado en juego en el enfoque intercultural y participativo en la gestión de la alta montaña en Colombia: el conflicto entre valores e intereses vinculados a la tierra y el territorio, “en contextos de gran asimetría en el poder”.

Lo que Svampa (2019) llama el giro ecoterritorial tiene que ver con la defensa de valores e intereses que han sido marginalizados históricamente en el concierto de las relaciones de poder. Los lenguajes de valoración del territorio del giro ecoterritorial nacen de las luchas socioambientales y se nutren de la matriz indígena-comunitaria, la narrativa autonómica, en clave ambientalista y feminista. Si bien no se trata de posiciones idénticas ni libres de conflictos, para la autora, estas matrices se articulan en estructuras de significación contestatarias y alternativas.

Lo anterior es, sin duda, un avance significativo para el reconocimiento y la visibilización de la pluralidad de visiones sobre el páramo por parte de las instituciones; sin embargo, la ley enmarca ese reconocimiento de forma instrumental para evitar los conflictos y subsanar las afectaciones derivadas del modelo que el

Estado impone y constituye como hegemónico. Si el paradigma del bienestar social está ligado necesariamente al crecimiento económico, el desarrollo sostenible y el progreso material, la multiplicidad de las visiones, experiencias, conocimientos y territorialidades de la alta montaña solo servirán de ornamento para una política ambiental que se ubica, de entrada, desde una visión totalizante de la relación páramo – sociedad.

CONCLUSIONES

Desde el paradigma del desarrollo sostenible solo sería posible el páramo que corresponde a la territorialidad estatal, es decir, el páramo que sirve al propósito de proveer servicios ecosistémicos; en últimas, el páramo que sirve al propósito del desarrollo y el progreso. La pluralidad de visiones y territoriales paramunas no podría ser realmente reconocidas bajo esta lógica como interlocutoras del Estado. Siguiendo a Haraway, el encuentro de una pluralidad de visiones sobre el páramo solo se puede dar desde posturas que reconocen su propia visión como parcial, como necesariamente marcada, situada y atravesada por relaciones desiguales de poder.

La pregunta es si el Estado colombiano, dada su inserción en el sistema global del poder y sus marcos normativos, especialmente, en material ambiental –bajo los intereses y las miradas de los gobernantes y legisladores de turno–, se puede reconocer a sí mismo como una visión parcial. Como se mostró en este artículo, esto no parece ser el caso; por eso, en términos de cómo actualmente el Estado ordena y regula la relación sociedad – páramos, uno de los efectos del paradigma del desarrollo sostenible es que parece incapaz de renunciar a su pretensión de validez universal y neutralidad política y epistémica, pretendiendo acomodar, dentro de sí, toda otra postura posible o excluirla completamente, en caso de no poder hacerlo. Esto significa que la visión del desarrollo sostenible, incluso, en su versión participativa e intercultural, se presenta como una visión desde ninguna parte, un punto de vista privilegiado, que no reconoce sus privilegios, que no pone en juego sus principales premisas sobre el bienestar.

Conflictos de intereses: la autora declara que no existe ningún conflicto de interés que ponga en riesgo la validez de los resultados. **Financiación:** la escritura de este artículo fue financiada por la comisión de estudio, otorgada mediante la resolución 0232 de 2021 de la Rectoría de la Universidad Pedagógica Nacional de Colombia. Y la beca “Doctorado Nacional para profesores de IES” del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación de Colombia.

REFERENCIAS

- ASAMBLEA NACIONAL CONSTITUYENTE. 1991. Constitución Política de Colombia 1991.
- CABNAL, L. 2010. Feminismos diversos: el feminismo comunitario. Feminista Siempre. Ascur las Segovias. 33p.
- CONGRESO DE COLOMBIA. 1936. Ley 200 de 1936. Sobre régimen de tierras.

- CONGRESO DE COLOMBIA. 1959. Ley 2 de 1959. Por la cual se dictan normas sobre economía forestal y conservación de recursos naturales renovables.
- CONGRESO DE COLOMBIA. 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.
- CONGRESO DE COLOMBIA. 2011. Ley 1450 de 2011. Por la cual se expide el Plan Nacional de Desarrollo, 2010-2014.
- CONGRESO DE COLOMBIA. 2018. Ley 1930 de 2018. Por medio de la cual se dictan disposiciones para gestión integral de los páramos en Colombia.
- ESCOBAR, A. 2014. La invención del desarrollo. Universidad del Cauca. Popayán, Colombia. 359p.
- ESTEVA, G. 1996. Desarrollo. En: SACHS, W. (ed.) Diccionario del desarrollo. una guía del conocimiento como poder. PRATEC. Perú. p.52-78.
- GUDYNAS, E. 2004. Ecología, economía y ética del desarrollo. Coscoroba Ediciones. Montevideo, Uruguay. 257p.
- HARAWAY, D.J. 1995. Ciencia, cyborgs y mujeres. La reinvención de la naturaleza. Cátedra. Barcelona, España. 431p.
- HOFSTEDE, R. 2013. Lo mucho que sabemos del páramo. Apuntes sobre el conocimiento actual de la integridad, la transformación y la conservación del páramo” En: Cortés-Duque, C.; Sarmiento, C. (eds.) Visión socioecosistémica de los páramos de la alta montaña colombiana: memorias del proceso de definición de criterios para la delimitación de páramos. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. p.113-125.
- INSTITUTO ALEXANDER VON HUMBOLDT, IAVH. 2017. Recomendación para la delimitación, por parte del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, del Complejo de Páramos de Guerrero a escala 1:25.000. Bogotá: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt – Fondo Adaptación.
- LLAMBÍ, L.; CUESTA, F. 2014. La diversidad de los páramos andinos en el espacio y en el tiempo. En: Cuesta, F.; Sevink, J.; Llambí, L.D.; De Bièvre, B.; Posner, J. (eds.) Avances en investigación para la conservación de los páramos andinos. CONDESAN. Lima, Quito. p.7-38.
- MACHADO ARAÓZ, H. 2013. Crisis ecológica, conflictos socioambientales y orden neocolonial: Las paradojas de Nuestra América en las fronteras del extractivismo. Revista Brasileira de Estudos Latino-Americanos. 3(2):118-155.
- MAFFI, L. 2014. An Introduction to biocultural diversity: The true web of life. En: Maffi, L.; Dilts, O. Biocultural diversity toolkit. Terralingua. p.1-43.
- MOHANTY, C.; RUSSO, A.; TORRES, L. 1991. Third World Women and the Politics of Feminism. Indiana University Press. Bloomington and Indianapolis. 338p.
- MURCIA, D. 2012. La naturaleza con derechos. Un recorrido por el derecho internacional de los derechos humanos, del ambiente y del desarrollo. Instituto de Estudios Ecologistas del Tercer Mundo. Quito, Ecuador. 132p.
- NACIONES UNIDAS, ONU. 1972. Informe de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Humano. Disponible desde Internet en: <https://undocs.org/es/A/CONF.48/14/Rev.1>
- NACIONES UNIDAS, ONU. 1986. Declaración sobre el derecho al desarrollo. Disponible desde Internet en: <https://www.ohchr.org/es/instruments-mechanisms/instruments/declaration-right-development>
- NACIONES UNIDAS, ONU. 1992. Declaración de Río sobre el medio ambiente y el desarrollo. Disponible desde Internet en: <https://www.un.org/spanish/esa/sustdev/documents/declaracionrio.htm>
- NACIONES UNIDAS, ONU. 1987. Informe de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo. Disponible desde Internet en: <https://www.un.org/es/ga/president/65/issues/sustdev.shtml>
- PARRA-ROMERO, A.; CASTILLO-ESTUPIÑAN, C.C. 2023. ¿Estamos sobre la misma montaña? Por una apertura ontológica de la conservación de los páramos. Ambiente e Sociedade 26:e1331. <https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc20210133r1vu2023L1ARO>
- PLUMWOOD, V. 2003. Feminism and the mastery of nature. Routledge. London and New York. 250p.
- RODRÍGUEZ, C. 2021. Participación y gobernanza. Caminos posibles para el manejo integral de los páramos. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt. Bogotá. 172p.
- SAID, E. 1978. Orientalism. Pantheon Books. New York. 368p.
- SALAS-BARRETO, A.D.; ESTUPIÑAN-CRUZ, A.L. 2025. Explotación minera y conflictividad socioambiental en el páramo Cruz Verde-Sumapaz, Colombia, 2011-2021. Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía. 33(2):467-484. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v33n2.111054>
- SARMIENTO, C.; LEÓN, O. 2015. Transición bosque-páramo. Bases conceptuales y métodos para su identificación en los Andes colombianos. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.

- SHIVA, V. 2005. Manifiesto para una democracia de la tierra. Paidós. Barcelona. 232p.
- SVAMPA, M. 2019. Las fronteras del neoextractivismo en América Latina. Conflictos socioambientales, giro ecoterritorial y nuevas dependencias. Universidad de Guadalajara y Calas. 142p.
- UNGAR, P. 2015. Hojas de ruta. Guías para el estudio socioecológico de la alta montaña en Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá. 58p.
- UNGAR, P.; MORALES, D.; OSEJO, A.; RODRÍGUEZ, C.; RUIZ, O.; FRIERI, S.; PACHÓN, F. 2019. Documento con insumos técnicos que apoyen la gestión de conflictos socioambientales actuales y potenciales con un enfoque territorial y énfasis en alta montaña. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá. 61

Pares evaluadores

El Comité Editorial y el Comité Científico desean expresar sus agradecimientos a todos los investigadores que colaboraron en la evaluación de manuscritos, entre los meses de enero a junio de 2025. Nuestra gratitud a su invaluable apoyo.

En reconocimiento publicamos sus nombres:

Ph.D. Bruna Arruda, Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Bogotá, **Colombia**
Ph.D. Rita María Ávila G. de Hernández, Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado, Venezuela, Lara, **Venezuela**
Ph.D. Rosendo Balois Morales, Universidad Autónoma de Nayarit, Nayarit, **México**
Ph.D. Alfredo Alberto Beyer Arteaga, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, **Perú**
Ph.D. Luciano Carassay, Universidad Nacional de La Pampa, La Pampa, **Argentina**
Ph.D. Venancio Cuevas Reyes, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Texcoco, **México**
Ph.D. Raúl Jacobo Delgado Macuil, Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, **México**
M.Sc. José Javier de la Mata, Universidad Nacional de La Pampa, La Pampa, **Argentina**
Ph.D. Jorge Dionisio Etchevers Barra, Colegio de Postgraduados, Montecillo, **México**
Ph.D. Luis Hernando Estupiñán Bravo, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, **Colombia**
Ph.D. Adriana Florentino, Universidad Central de Venezuela, Caracas, **Venezuela**
Ph.D. Nelino Florida Rofner, Universidad Nacional Agraria de la Selva, Huanuco, **Perú**
Ph.D. Porfirio Raúl Galicia García, Universidad Tecnológica de Tecámac, Tecámac, **México**
Ph.D. Ostin Garcés Ordoñez, Universidad de La Guajira, Riohacha, **Colombia**
Ph.D. Jose Francisco Goicochea Vargas, Universidad Nacional Hermilio Valdizan - Huánuco, **Perú**
Ph.D.(c) Ana Cecilia Hernández Coronado, Universidad Autónoma de Baja California, Baja California, **México**
Ph.D. Herminia Alejandra Hernández Ortega, Universidad de Colima, Colima, **México**
Ph.D. Frank Guillermo Intriago Flor, Universidad Técnica de Manabí, Manabí, **Ecuador**
Ph.D. Arturo Martínez Jiménez, Universidad Autónoma Metropolitana, Iztapalapa, **México**
Ph.D. Andrea Limoeiro Cavalho, Escuela Politécnica de la Universidade Federal da Bahia, Salvador, **Brasil**
Ph.D. Luis Carlos Losada Benavides, Universidad del Cauca, Popayán, Cauca, **Colombia**
Ph.D. Ana Teresa Mosquera Espinosa, Pontificia Universidad Javeriana Cali, Cali, **Colombia**
Ph.D. Jader Muñoz Ramos, Universidad del Tolima, Ibagué, **Colombia**
Ph.D. Amado Enrique Navarro Frómata, Universidad Tecnológica de Izúcar de Matamoros, Puebla, **México**
M.Sc. Helber Milton Orjuela, Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales, Bogotá, **Colombia**
Ph.D. Vandré Julian Palacios, Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales, Bogotá, **Colombia**
Ph.D. Jhoan Alfredo Pula Montiel, Universidad de las Fuerzas Armadas, Sangolquí, **Ecuador**
Ph.D. Gabriela Posse, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, **Argentina**
Ph.D. Maribel Quezada Cruz, Universidad Tecnológica de Tecámac, Tecámac, **México**
Ph.D. Teóduo Quezada, Universidad Autónoma de Aguascalientes, Aguascalientes, **México**
Ph.D. Sandra Quijas Fonseca, Universidad de Guadalajara, Guadalajara, **México**
Ph.D. Juan Sebastian Ramírez Navas, Universidad del Valle, Cali, **Colombia**
Ph.D. Jhon Tailor Rengifo Mosquera, Universidad Tecnológica del Chocó, Quibdó, **Colombia**
Ph.D. Humberto Reyes Hernández, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, **México**
Ph.D. Luz Piedad Romero, Jardín Botánico de Medellín, Medellín, **Colombia**
Ph.D. Homero Alonso Sánchez, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, **México**
Ph.D. Iván Andrés Sánchez Ortiz, Universidad de Nariño, San Juan de Pasto, **Colombia**
Ph.D. Luis Miguel Sandoval Borrás, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, **Colombia**
Ph.D. Andrea Vásquez García, Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Bogotá, **Colombia**
Ph.D. Maryen Alberto Vásquez, Universidad de la Habana, Habana, **Cuba**
Ph.D. Vicente Eliezer Vega Murillo, Universidad Veracruzana, Veracruz, **México**
Ph.D. Soledad Camila Villamil, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, **Argentina**
Ph.D. Magda Piedad Restrepo Valdés, Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Bogotá, **Colombia**
Ph.D. Claudia Rodríguez, Universidad Nacional de Rio Cuarto, Córdoba, **Argentina**
Ph.D. Duilio Torres Rodríguez, Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado, Barquisimeto, **Venezuela**

La **U.D.C.A**

El punto de partida para tu proyecto de vida

¡Conoce nuestra oferta **Académica!**



**Programas
de Posgrados**



**Programas
de Pregrados**

