

REVISTA

U.D.C.A

ACTUALIDAD & DIVULGACIÓN CIENTÍFICA

Revista Científica | ISSN: 2619-2551 (en línea) ISSN: 0123-4226 (impreso) | julio- diciembre 2024 | Volumen 27 No. 2 D.L. | Bogotá, D.C. - Colombia



Autor fotografía: Yuliana Rincón Acero

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. Además, el presente número cuenta con el apoyo financiero del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación, a través de la convocatoria No. 1041 de 2022.

*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. Furthermore, this issue has the financial support of the Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación, through announcement No. 1041 of 2022.

*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. Além disso, esta edição conta com o apoio financeiro do Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación, através do anuncio No 1041 de 2022.

*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

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 del Nordeste 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 Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A
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

Julietta Domínguez Soberanes
Universidad Panamericana
Aguascalientes, México

Laura Barcia Rivera
Universidad de la República
Montevideo, Uruguay

Luz Piedad Romero Duque
Jardín Botánico de Medellín
Medellín, Colombia

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

Asistente editorial
Héctor William Duarte Gómez
Yomaira Liney Pinto Acero

Diagramador
Fabian Ernesto Ramírez Cárdenas

CONTENIDO

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

Volumen 27 número 2 - julio-diciembre, 2024

<https://doi.org/10.31910/rudca.v27.n2.2024>

EDITORIAL

- Conferencia de las Naciones Unidas sobre Biodiversidad 2024 (COP16), un evento para medir el futuro del planeta
Germán Anzola Monteroe2777
<https://doi.org/10.31910/rudca.v27.n2.2024.2777>

CIENCIAS AGRARIAS

- Pronóstico de la provisión azucarera agroindustrial en Matanzas, Cuba
Yasmany García-López, Lourdes Yamen González-Sáez, Juan Alfredo Cabrera-Hernández.....e2555
<https://doi.org/10.31910/rudca.v27.n2.2024.2555>
- Uso equivalente de la tierra e índices de crecimiento y eficiencia fisiológica en cultivos intercalados de yuca, maní y maíz
Diana María Sánchez-Olaya, Daniela Fernanda Bautista-Bobórquez, Karla Vanessa Cabrera-Parra.....e2603
<https://doi.org/10.31910/rudca.v27.n2.2024.2603>
- Evaluación de indicadores de sostenibilidad del suelo y de salud del cultivo en sistemas convencionales y orgánicos de yuca
Luis Felipe De-La-Ossa-Puello, José Luis Barrera-Violeth, Enrique Miguel Combatt-Caballero.....e2402
<https://doi.org/10.31910/rudca.v27.n2.2024.2402>
- Efecto del régimen de humedad del suelo sobre la producción del zapallo *Cucurbita moschata* Duchesne
Robert Augusto Rodríguez-Restrepo, Harold Tafur-Hermann, Sanin Ortiz-Grisales, Magda Piedad Valdés-Restrepo.....e2477
<https://doi.org/10.31910/rudca.v27.n2.2024.2477>
- Propiedades físicas de un suelo sometido a la aplicación de diferentes cantidades de materia orgánica de escarabajo
Juan Pablo Fernández-Rodríguez, Javier Giovanni Álvarez-Herrera, Marilcen Jaime-Guerrero.....e2561
<https://doi.org/10.31910/rudca.v27.n2.2024.2561>
- Análisis comparativo de dos protocolos de aislamiento de ADN en hojas secas de mango (*Mangifera indica* L.) para uso en técnicas moleculares
Enrique Pardo-Pérez, Leandro Anaya-Palmera, Teodora Cavadiá-Martínez.....e2403
<https://doi.org/10.31910/rudca.v27.n2.2024.2403>
- Evaluation of sampling methods of *Diaphorina citri* Kuwayama (Hemiptera: Liviidae) in two citrus growing áreas
Lumey Perez-Artiles, José Mauricio Montes Rodríguez, Madeleyne Parra-Fuentes, Carlos Esteban Brochero-Bustamante, Juan Felipe Ossa-Yepes, Luisa Fernanda Guzmán-Sánchez.....e2724
<https://doi.org/10.31910/rudca.v27.n2.2024.2724>
- Comportamiento agronómico de cuarenta y un cruces interclonales de cacao (*Theobroma cacao* L.) en Ecuador
Jaime Fabián Vera-Chang, Nataly Lorena Herrera-Tamayo, Ana Ruth Alvarez-Sanchez, Andry Annabel Alvarez-Aspiaz, Edison Geovanny Díaz-Camposano, Luis Humberto Vásquez-Corteze2729
<https://doi.org/10.31910/rudca.v27.n2.2024.2729>
- Caracterización química, actividad bactericida y antioxidante de ácidos biliares presentes en la bilis de bovinos
Cristian Camargo-Pereira, Camilo Guzmán-Terán, Karina Causil-Espitia, Mary Cecilia Montaña-Castañeda, Alfonso Calderón Rangel..e2488
<https://doi.org/10.31910/rudca.v27.n2.2024.2488>
- Fatty acid profile on the eggs and the muscle of *Eremophilus mutisii* females from three different fishing areas
Rafael Rosado, Melissa Espejo-Cortés, Liliana Rodríguez, Gonzalo Díaz, Jairo Granados, Miguel Landines.....e2367
<https://doi.org/10.31910/rudca.v27.n2.2024.2367>
- Tipificación citomorfológica del tumor venéreo transmisible canino y su correlación con la presentación clínica en perros de Yopal-Casanare
Claudia Fernanda Medina-Lombana, Juan Camilo Rubiano-Chávez, Martha Eliana Lozano-Perez, Ana Maria Chavarro-Medina.....e2560
<https://doi.org/10.31910/rudca.v27.n2.2024.2560>

Optimization of a cape gooseberry colloidal system for the micro-encapsulation process
Soany Eraso-Grisales, Misael Cortés-Rodríguez, Andrés Hurtado-Benavides.....e2060
<https://doi.org/10.31910/rudca.v27.n2.2024.2060>

Comparison of consumer perception of Colombian and Mexican blueberries (*Vaccinium corymbosum* L. cv. Biloxi)
Jessica Rubiano-Moreno, Violeta Corona, Alejandro Rodríguez-Magaña, Purificación García-Segovia.....e2199
<https://doi.org/10.31910/rudca.v27.n2.2024.2199>

Development of functional panela cheese enriched with prebiotics and probiotics
Karina Tiscareño-Ortega, Norma Angélica Chávez-Vela, Julieta Domínguez-Soberanes, Gabriela Mariana Rodríguez-Serrno.....e2656
<https://doi.org/10.31910/rudca.v27.n2.2024.2656>

Modelo para la gestión de vulnerabilidades enfocado en la soberanía y seguridad alimentaria: caso de estudio Provincia Guantánamo
Yousy Baby-Ramírez, Liliana María Gómez-Luna, Rosario León-Robaina.....e2738
<https://doi.org/10.31910/rudca.v27.n2.2024.2738>

Estudio de mercado de alevinos en el departamento de Arauca como estrategia de fortalecimiento de la acuicultura
Dairo Burgos-Cañas, Andrés Camilo Correa-Nuñez, Andrea Carolina Piza-Jerez.....e2726
<https://doi.org/10.31910/rudca.v27.n2.2024.2726>

CIENCIAS NATURALES

Etnobotánica de las cactáceas andinas de Boyacá-Colombia: contribución a su conservación y saberes tradicionales
Daniela Porras-Flórez, Sofía Albesiano, Kendry Hernández-Herrera, Nubia Gómez-Velascoe2712
<https://doi.org/10.31910/rudca.v27.n2.2024.2712>

Ecosystem services assessment of the Jardín Botánico de Bogotá
Vandré Julián Palacios-Bucheli, Lizeth Daniela Cristancho-Gavilán, Julio César Gaitán-Silva, Yerly Caterinhe Gil-Muñoz, Manuel Enrique Morales-Linares, David Alejandro Reyes-Rico, Aura Mayerly Martínez-Rojase2525
<https://doi.org/10.31910/rudca.v27.n2.2024.2525>

Caracterización de la lluvia y el banco de semillas en un relicto de bosque inundable urbano en proceso de restauración ecológica
Bibiana Pérez Suárez.....e2396
<https://doi.org/10.31910/rudca.v27.n2.2024.2396>

Arquitectura de referencia para un laboratorio virtual como herramienta de sistematización de datos de biodiversidad
Juan Pablo Cuevas-Gonzalez, Fernando Fernandez-Mendez, Kelly T. Bocanegra-González.....e2389
<https://doi.org/10.31910/rudca.v27.n2.2024.2389>

Identificación inmunohistoquímica de las citoqueratinas 14 y 19 durante el desarrollo dental
Kevin Díaz-Rojas, Victor Simancas-Escorcia.....e2486
<https://doi.org/10.31910/rudca.v27.n2.2024.2486>

PARES EVALUADORES

Conferencia de las Naciones Unidas sobre Biodiversidad 2024 (COP16), un evento para medir el futuro del planeta

2024 United Nations Biodiversity Conference (COP16), an event to measure the future of the planet

Germán Anzola Montero¹ 

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

Como citar: Anzola Montero, G. 2024. Conferencia de las Naciones Unidas sobre Biodiversidad 2024 (COP16), un evento para medir el futuro del planeta. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 27(2):e2777. <http://doi.org/10.31910/rudca.v27.n2.2024.2777>

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

Indiscutiblemente, la pérdida de la biodiversidad es un tema que abriga preocupación en la humanidad, puesto que, por miles de años, la naturaleza ha sido la encargada de mantener el equilibrio en el mundo; sin embargo, no se ha puesto una barrera para mitigar este desastre, anunciado con el cambio climático que, en la actualidad, muchas Naciones están afrontando.

El aumento de los fenómenos meteorológicos, como el huracán Helene, que causó destrucción por el sureste de Estados Unidos; el huracán John, que también devastó al puerto de Acapulco y que dejó millones de personas damnificadas; las inundaciones por la DANA, que afectó distintas zonas de España, como Aragón, Castilla-La Mancha, Andalucía, Cataluña y Comunidad Valenciana; marejadas ciclónicas insuperables; Shanghái azotada por el tifón Bebinca; la tormenta Boris, que golpeó a Europa central y oriental, resultando en graves inundaciones en República Checa, Eslovaquia, Polonia, Rumanía y Austria; tormentas eléctricas y lluvias torrenciales, que arrasaron con todo a su paso y el calentamiento anómalo que ha sufrido el agua del mar, son algunos ejemplos que nos ponen en alerta y nos hacen un llamado para recuperar y proteger la naturaleza.

Esta introducción hizo parte de la invitación que convocó la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Biodiversidad al mega evento de la COP16, que permitió analizar qué tanto se implementó después de finalizada la COP15, en Montreal (Canadá), en 2022, para salvaguardar la naturaleza, para esta transición climática.

Los gobiernos de 190 países, miembros del Convenio sobre la Diversidad Biológica, se dieron cita en Cali, Colombia, del 21 de octubre al primero de noviembre de 2024, con el objetivo de discutir y tomar decisiones sobre políticas y estrategias globales, relacionadas con los desafíos emergentes en la conservación de la biodiversidad, el cambio climático y el desarrollo sostenible.

Para abrir un debate sobre el tema, tomo como referencia la agenda oficial de la COP16, que se llevó a cabo tanto en la Zona Azul, un espacio para las conferencias y las negociaciones gestionados por el Convenio sobre la Diversidad Biológica, es decir, el lugar para las sesiones oficiales y el Programa de Acción y Participación, abierto al público, en la Zona Verde, donde se programaron conferencias, paneles de discusión, talleres, exposiciones de proyectos ambientales y otras actividades de índole cultural.

El financiamiento para la conservación de la biodiversidad, sin lugar a duda, es un avance sin precedentes, donde se acuerda que las empresas de los sectores industriales de la cosmética, la farmacéutica y la agrícola deben compartir sus resultados derivados de la información genética, obtenida de investigaciones apoyadas en la biodiversidad; ello indica, que deben aportar de sus ingresos o ganancias, un porcentaje al Fondo Global de Conservación, para beneficiar a las comunidades locales, entre ellas, las indígenas, quienes defienden la biodiversidad y las especies en riesgo. Este Fondo será administrado por la ONU, cuyo fin será apoyar las iniciativas de conservación, en el mundo (Presidencia, 2024).

El problema que se está tratando de resolver con este Fondo que no se logró definir, en la COP16, una estrategia precisa para incrementar los fondos, destinados a la lucha contra la pérdida de la biodiversidad, a pesar de que las delegaciones diplomáticas expresaron su preocupación por el compromiso financiero, para hacer viables iniciativas de conservación. Sencillamente, sigue siendo un desafío.

Paralelo a esta iniciativa, la COP16 también enfatizó en abrir espacios de participación inclusiva y fortalecer la gobernanza, en el sentido de crear el Órgano Subsidiario para Comunidades Indígenas y Locales, que permita integrar, por un lado, a las

colectividades indígenas, para que ellos, como custodios de la biodiversidad y por la importancia de sus conocimientos ancestrales y tradicionales, puedan tomar decisiones claves, sobre la conservación y la preservación de la naturaleza y, por otro, a las comunidades afrodescendientes, por su contribución a la protección de los derechos sobre los territorios. Para ello, varios gobiernos se comprometieron en robustecer la gobernanza participativa en sus territorios (Presidencia, 2024).

La COP16 también hizo un llamado para proteger y dar asistencia legal, a los defensores ambientales, a través de la creación de una red de apoyo, ofreciéndoles asistencia legal, en casos de riesgo y brindándoles capacitación en diversos temas, como derechos humanos y protección. Se precisó que, en Colombia, los defensores del medio ambiente se enfrentan a graves peligros, debido a que en algunas zonas, de alto valor ecológico, se registran casos de conflicto armado y expansión de actividades extractivas.

También, se presentaron otras iniciativas, entre ellas, la restauración y la protección de ecosistemas en estado crítico, en especial, ecosistemas marinos y terrestres, que guarecen una biodiversidad muy representativa, como arrecifes de coral, zonas de manglares y selvas tropicales, fundamentales para el equilibrio ambiental.

La COP16 planteó una serie de proyectos, como la restauración ecológica para las áreas más degradadas, que incluye reforestación, regeneración de humedales y la recuperación de zonas de pastizales, las cuales, para el 2030, los países se comprometieron a restaurarlas en un 30 %. Asimismo, se acordó rastrear estos avances y con ayuda de tecnologías avanzadas, supervisar las áreas de conservación y tener un referente de actuación, para los cambios negativos de los ecosistemas (Presidencia, 2024).

No se dejó de lado el tema de sensibilizar a la población mundial sobre la importancia de la biodiversidad y las repercusiones de las decisiones que se toman, alrededor del tema de conservación de la naturaleza y, para ello, se lanzaron campañas globales, que abordan la educación ambiental y la conciencia pública. Asimismo, se hizo un llamado a la juventud, para comprometerlos a ser líderes para fomentar y promover la conservación.

En conclusión, los gobiernos, la academia, el sector privado y los líderes demostraron que sí hubo avances significativos en la protección de la biodiversidad; sin embargo, quedaron muchos desafíos y esfuerzos globales para hacer efectiva la conservación de la naturaleza

Como Rector de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A me aúno a este llamado, como un aliado para presentar propuestas, desde los tres pilares fundamentales de la docencia, la investigación y la extensión, que conduzcan a tomar decisiones en temas tan relevantes, como la conservación, el uso sostenible y el monitoreo de la biodiversidad.

Ya abrimos camino, desde hace varios años, con la participación en los estudios técnicos que dieron como resultado la declaratoria de

la Reserva Forestal Productora del Norte Thomas van der Hammen y venimos apadrinando el Humedal Torca-Guaymaral, casi una década, lo que ha permitido generar estudios de la biodiversidad que aportan a los procesos de conservación.

El compromiso de la U.D.C.A con los temas ambientales se ve reflejado, actualmente, con la firma del acuerdo para la Conservación de la Reserva Forestal Productora del Norte Thomas van der Hammen, celebrado entre la Universidad y la Secretaría Distrital de Ambiente, para trabajar conjuntamente en el fortalecimiento de la investigación, la educación y la gestión ambiental, en los socioecosistemas del borde norte de Bogotá.

La Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, desde su Proyecto Educativo Institucional, define a la sostenibilidad, “como un proceso transversal y holístico, que debe generar un desarrollo humano, que logre una armonía con uno mismo, con los otros seres vivos y con la naturaleza y que aporte a mitigar la crisis ambiental global y a la Educación Superior para el Desarrollo Sostenible, como su dinamizador” (PEI, 2024). A partir de esta definición, el plan de transformación de la U.D.C.A apunta a la transición hacia la Sostenibilidad, haciendo uso de todas las acciones necesarias para alcanzar la meta de ser sostenibles, como Comunidad Universitaria y aportarle, positivamente, a la sociedad colombiana. Por lo anterior, la U.D.C.A alinea su estrategia universitaria con la sostenibilidad, para identificar y aportar en el logro de la Agenda 2030 y para articular sus funciones misionales, por lo tanto, se plantea a la Educación para el Desarrollo Sostenible (EDS), como una opción de formación desde el ser, el saber y el hacer, alentando a los estudiantes a convertirse en agentes de cambio, que tengan los conocimientos, los medios y el compromiso para adoptar medidas transformadoras, en pro del desarrollo sostenible.

REFERENCIAS

PRESIDENCIA DE LA REPÚBLICA. 2024. Balance COP16 / Lo más destacado de la cumbre que mostró por qué Colombia es potencia mundial de la vida. Disponible desde Internet en: <https://www.presidencia.gov.co/prensa/Paginas/Balance-COP16-Lo-mas-destacado-de-la-cumbre-que-mostro-por-que-Colombia-es-potencia-mundial-de-la-vida-241103.aspx>

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>

Pronóstico de la provisión azucarera agroindustrial en Matanzas, Cuba

Forecasting of the agro-industrial sugar provision in Matanzas, Cuba

Yasmany García-López^{1*} ; Lourdes Yamen González-Sáez² ; Juan Alfredo Cabrera-Hernández³ 

¹Instituto de Investigaciones de la Caña de Azúcar. Matanzas, Cuba; e-mail: yasmanygarcia31@gmail.com

²Universidad de Matanzas, Departamento de Química e Ingeniería Química. Matanzas, Cuba; e-mail: lourdesgonzalez71@gmail.com

³Universidad de Matanzas, Observatorio Ambiental COSTATENAS. Matanzas, Cuba; e-mail: alfredojuan1956@gmail.com

*autor de correspondencia: yasmanygarcia31@gmail.com

Cómo citar: García-López, Y.; González-Sáez, L.Y.; Cabrera-Hernández, J.A. 2024. Pronóstico de la provisión azucarera agroindustrial en Matanzas, Cuba. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 27(2):e2555. <http://doi.org/10.31910/rudca.v27.n2.2024.2555>

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 3 de 2024

Aceptado: noviembre 25 de 2024

Editado por: Helber Adrián Arévalo Maldonado

RESUMEN

El pronóstico de la provisión azucarera puede ser un instrumento fundamental en la toma de decisiones y en el manejo inteligente de recursos para contribuir con la sostenibilidad de la agroindustria azucarera. Para ello, en el presente trabajo se abordó, como caso de estudio, el análisis del registro histórico del procesamiento industrial de la caña de azúcar en el municipio Calimete, provincia Matanzas, Cuba. Se consideró, en el período de 2004 a 2021, a los kilogramos de azúcar por toneladas de tallos molidos, como indicador de provisión azucarera y se ajustó un modelo ARIMA estacional, con una escala trimestral. El modelo cumplió con los criterios de diagnóstico y de validación. A través del análisis de series de tiempo, se pudo pronosticar el indicador de provisión azucarera, a partir de su comportamiento histórico, lo que puede contribuir a la prevención o mitigación de escenarios futuros no deseados.

Palabras clave: Agroindustria azucarera; Modelo ARIMA; *Saccharum officinarum*; Serie de tiempo; Servicio de provisión.

ABSTRACT

The forecast of the sugar provision can be a fundamental tool for decision-making and the intelligent management of resources to contribute to the sustainability of the sugar agroindustry. For this purpose, in the present work, the analysis of the historical record of the industrial processing of sugar cane in the Calimete municipality, Matanzas province, Cuba, was addressed as a case study. In the period from 2004 to 2021, the kilograms of sugar per ton of ground stalks were considered as an indicator of sugar provision and a seasonal ARIMA model was adjusted with a quarterly scale. The model met the diagnostic and validation criteria. Thus, through time series analysis, the sugar provision indicator could be forecast based on its historical performance. Which can contribute to the prevention or mitigation of unwanted future scenarios.

Keywords: ARIMA Model; Provision service; *Saccharum officinarum*; Sugar agroindustry; Time series.

INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas y agroecosistemas proveen importantes servicios ecosistémicos que favorecen el bienestar humano. El enfoque de servicios ecosistémicos comprende los términos de provisión, regulación, cultural y soporte (Adhikari & Hartemink, 2016; Waweru *et al.* 2016; De Groot *et al.* 2017). Según Costanza *et al.* (1997), los servicios ecosistémicos son flujos de materiales, energía e información del capital natural, lo que, en combinación con servicios del capital humano, favorecen el bienestar humano. Para Burkhard & Maes (2017) son los aportes de las estructuras y funciones de los ecosistemas, en combinación con otros diversos elementos de entrada y proveen bienestar a la sociedad. Con el paso del tiempo, los conceptos han evolucionado con un sustento ecológico; sin embargo, siempre se enfatiza en el vínculo entre ecosistemas y bienestar humano (De Groot *et al.* 2017).

En la agroindustria azucarera, como la mayoría de los procesos productivos, se persigue el incremento del servicio de provisión, traducido en la cantidad de azúcar producida y, para ello, el ecosistema se ha transformado en campos agropecuarios (García *et al.* 2022) o de fines industriales. En estos contextos, los pronósticos de rendimientos pueden ser utilizados para análisis de oferta y demanda, así como en la construcción de escenarios sobre seguridad alimentaria (Delgadillo-Ruiz *et al.* 2016). Por ello, el uso de modelos para prever los comportamientos de propiedades es una parte importante en el análisis de procesos industriales (Istifanus *et al.* 2018).

Un análisis frecuente en diversas áreas de investigación es la serie de tiempo, donde las tendencias de indicadores para una escala temporal se pueden estudiar, gracias a la existencia de registros históricos (Amaris *et al.* 2017). Los análisis de series de tiempo, mediante la metodología de Box y Jenkins, se emplean en diferentes ámbitos (Alonso, 2021) que, en la actualidad, son más viables, por la existencia de diversos materiales y herramientas estadísticas, como es el caso de la librería *forecast* (Hyndman *et al.* 2018), para el lenguaje de programación (R), así como el libro *Hands-on Time Series Analysis with R*, junto a la librería *TSstudio* (Krispin, 2019).

Las series de tiempo son una sucesión de valores aleatorios, con cierta periodicidad, ya sea anual, semestral, trimestral o diario, de acuerdo con la recopilación de los datos (Krispin, 2019). El beneficio de estos análisis radica en que, a partir de una sucesión pasada del parámetro, se obtiene un posible comportamiento futuro, lo que puede mejorar en sí, la toma de decisiones (Ferreira Bocca *et al.* 2015; Gil, 2016). Según Olivencia Polo *et al.* (2020), la toma de decisiones se caracteriza, con frecuencia, por condiciones de incertidumbre, en donde se requiere de una anticipación, mediante el análisis de dinámicas de datos en el tiempo, para favorecer el entendimiento de comportamientos, asociados a los procesos de soporte. De acuerdo con Rincón-Ruiz *et al.* (2014), esta comprensión es elemental para los servicios ecosistémicos. Así, la integración de big data y algoritmos de aprendizaje estadísticos permiten arribar a aproximaciones robustas, interdisciplinarias y útiles, para un enfoque ecosistémico (Manley *et al.* 2022).

Por tal motivo, el presente trabajo tuvo como finalidad el análisis de datos históricos para predecir, mediante un modelo ARIMA, la provisión azucarera agroindustrial.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del caso de estudio. La agroindustria estudiada se ubicó en el municipio Calimete, de la provincia Matanzas, entre las coordenadas 22°25'41" N a 22°36'22" N y 81°11'14" W a 80°48'25" W y se compone de un central para el procesamiento de la caña de azúcar, a fin de obtener diferentes productos requeridos por la sociedad. Para un enfoque ecosistémico se consideró, como indicador de provisión azucarera, la relación de kilogramos de azúcar por tonelada de tallos molidos (kg t^{-1}) (García *et al.* 2022). La utilización de este indicador permite enfocarse en la eficiencia para la obtención de la provisión de azúcar, como beneficio final comercializable. Así, en este trabajo, se abordaron los elementos esenciales para el pronóstico del servicio provisión azucarera (Figura 1).

Análisis de series de tiempo. Para los análisis exploratorios, ajuste de modelos y pronóstico de la provisión azucarera, se utilizó el lenguaje de programación (R) software, versión 3.6.0 (R Core Team, 2019). También fueron empleadas las librerías, *TSstudio* (Krispin, 2020) y *forecast* (Hyndman *et al.* 2018).

Para este estudio, los datos de provisión azucarera utilizados fueron consolidados por trimestres, para el período de enero, 2004 hasta mayo 2021. Se utilizó la metodología de Box – Jenkins, una de las más utilizadas, en el análisis de series de tiempo (Sanjeev *et al.* 2015; Mwanga *et al.* 2017; Hassan *et al.* 2019), mediante la cual, se llegó al pronóstico de la provisión azucarera, con un modelo autorregresivo (AR) integrado de medias móviles (MA), conocido como ARIMA [(p; d; q) (P; D; Q)s].

Los puntos clave de la metodología de Box-Jenkins, de acuerdo con Ramasubramanian & Singh (2019), se resumen en:

- a) Verificar si la serie es estacionaria; si no lo es, diferenciarla hasta alcanzarla.
- b) Identificar un modelo tentativo.
- c) Estimar el modelo.
- d) Verificar el diagnóstico (si este no es adecuado, volver al paso b).
- e) Usar el modelo para pronosticar.

En la elaboración del modelo ARIMA para la serie de tiempo, se consideró la existencia de variabilidad estacional, lo que implicó estimar, que la observación de un mismo mes en años diferentes, tienen una pauta de comportamiento similar, por lo tanto, el modelo ARIMA apropiado para este tipo de series, debe recoger los dos tipos de dependencia inter-temporal.



Figura 1. Diagrama general para el pronóstico del servicio de provisión azucarera (SPA).

En la identificación se proponen los modelos ARIMA (p, d, q) (P, D, Q)s, que representan el comportamiento de la serie de tiempo. En primer lugar, se analizó el carácter estacionario. La serie es estacionaria cuando presenta una media y varianza constante. Para el modelo, se seleccionaron los órdenes (p, q), que responden a la estructura regular estacionaria, mientras que (P, Q)s, corresponden a la estructura estacionaria estacional, donde (P, p) son el orden del polinomio autorregresivo estacionario; (Q, q), el orden del polinomio de medias móviles; (D, d), tienen que ver con la derivación necesaria para hacer a la serie estacionaria y (s) es el elemento relacionado a la variabilidad estacional, que es igual a 4, en el caso trimestral (Krispin, 2019). El carácter estacionario de la serie se comprueba mediante la prueba estadística de Dickey-Fuller, donde se establece:

1. Planteamiento de Hipótesis

2. $p\text{-value} < 0,05$

H_0 : La serie es no estacionaria.

H_1 : La serie es estacionaria.

La selección y estimación de los órdenes ($p; q$) y ($P; Q$), para que el modelo se ajuste a la serie estacionaria, se realizó mediante el estudio de la función de autocorrelación simple (ACF). Con el uso de la función “*auto.arima*” de la librería *forecast*, de Hyndman *et al.* (2018).

En la validación se comprobó que el modelo propuesto se ajustó a los datos y reproduce el comportamiento de la serie de tiempo. Para ello, se consideró el análisis de los residuos del modelo, con el análisis del acercamiento a una distribución normal. En el análisis de normalidad se utilizó el gráfico de histograma, así como la prueba de *Lilliefort*.

Se consideraron, además, las pruebas de Box-Pierce y Ljung-Box y los análisis de errores del modelo, con el análisis de la variación existente entre el valor real de la variable y su valor pronosticado (ecuación 1). También, se utilizaron los criterios Akaike (AIC), su forma corregida (AICc) y el criterio Bayesiano (BIC), acorde con Krispin (2019).

$$e_t = Y_t - F_t \tag{ecuación 1}$$

Donde:

e_t = error del pronóstico en el período t .

Y_t = valor real de la variable en el período t .

F_t = valor pronosticado de la variable en el período t .

Al establecerse observaciones y pronósticos para (n) períodos, se pudo calcular los (n) errores y se determinaron diferentes mediciones estadísticas, que permiten comparar entre modelos (ecuación 2 a 6). Estas fueron: error medio (*mean error*, o ME), raíz del error

cuadrático medio (*root mean square error*, o RMSE), error absoluto medio (*mean absolute error*, o MAE), error porcentual medio (*mean percentage error*, o MPE) y error porcentual absoluto medio (*mean absolute percentage error*, o MAPE) (Krispin, 2019).

$$ME = \frac{\sum(Y_t - F_t)}{n} \quad \text{ecuación 2}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (Y_t - F_t)^2} \quad \text{ecuación 3}$$

$$MAE = \frac{\sum |Y_t - F_t|}{n} \quad \text{ecuación 4}$$

$$MPE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left(\frac{Y_t - F_t}{Y_t} \right) * 100 \quad \text{ecuación 5}$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left| \frac{Y_t - F_t}{Y_t} \right| * 100 \quad \text{ecuación 6}$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Diagnóstico temporal. La provisión azucarera, expresada en kilogramos de azúcar por tonelada de tallos molidos (kg t^{-1}), según un análisis de series de tiempo, se puede descomponer en cuatro gráficos, que recogen los diferentes componentes relacionados con las variabilidades temporales (Figura 2).

La comprensión de la serie de tiempo se favorece con la descomposición en componentes: aleatorio, estacional y tendencia, además del comportamiento de los datos observado. De acuerdo con Ruiz López (2018), el componente aleatorio, también llamado ruido blanco, se caracteriza por variaciones sin un patrón definido alrededor de una media constante. A su vez, lo estacional sigue un patrón de cambio regular que se completa dentro de un año y se repite en base similar (Krispin, 2019). Por último, la tendencia presenta los efectos sobre la variable estudiada a largo plazo (Montes Páez *et al.* 2016) y, en este caso, se ha caracterizado por un decrecimiento de la provisión azucarera.

Según Grunewald *et al.* (2015), los servicios ecosistémicos se expresan a diferentes escalas de análisis. Lo cierto es que la agroindustria azucarera está marcada por la existencia de variabilidades espaciotemporales, que se origina desde el suelo, el cultivo y su procesamiento. Cada momento de zafra está condicionado por lo obtenido en los diferentes campos de producción del cultivo, como consecuencia de los manejos agrícolas, momento de cosecha y escenarios climáticos.

El rol del clima ha sido investigado por McGree *et al.* (2020) y utilizado como predictor en el análisis de rendimientos azucareros; sin embargo, no es el único factor que influye en los incrementos o decrecimientos de los rendimientos agrícolas e industriales. Conjuntamente, la

combinación de diferentes cultivares de caña de azúcar y composición de cepas pueden incidir en la cantidad de azúcar recuperada (Chiang González *et al.* 2018; Schmitz & Zhang, 2019). Además, las irregularidades del procesamiento de la caña de azúcar afectan la provisión azucarera, relacionados con la eficiencia industrial (García *et al.* 2022).

Se puede agregar que el análisis de los servicios ecosistémicos, en un contexto agroindustrial azucarero, también requiere de la comprensión de escalas de análisis. Escalas mayores permiten observar tendencias generales, mientras que en escalas menores, se observan mayores detalles para los procesos y manejos que inciden en la provisión azucarera. La extracción de sacarosa en una zafra, última etapa de la producción de azúcar arroja menores valores al inicio de la zafra, un aumento a mediados y una disminución hacia el final; sin embargo, se presentan variaciones dentro de cada mes de zafra, relacionado con el ciclo vegetativo del cultivo, los diversos cultivares que llegan al central y con la eficiencia industrial.

Modelo ajustado para el análisis temporal de la provisión azucarera. La base de datos recopilada se analizó según sus trimestres y se compararon diferentes modelos. La consolidación en trimestre de la serie respondió, en primera instancia, al interés de reflejar las variabilidades estacionales, que acontecen en las zafra azucareras.

La prueba de Dickey-Fuller, igual a 6,13, para un *lag* de 4 y un *p-value* igual a 0,11, no encuentra evidencias para rechazar la hipótesis nula de que la serie es no estacionaria, por lo que una derivación es de utilidad para el modelado de la misma. El modelo seleccionado ARIMA (0, 1, 1) (2, 1, 2) [4], se puede observar en la figura 3.

El estudio de la serie de tiempo es útil para realizar pronósticos del indicador seleccionado; sin embargo, es muy difícil que el valor pronosticado sea igual al valor real; solo se puede intentar obtener los menores errores posibles (Delgadillo-Ruiz *et al.* 2016). Un error bajo en los datos de entrenamiento, junto con un error alto en los datos de prueba, para los valores de MAPE, es indicio de sobre ajuste del modelo (Krispin, 2019). En este caso, el valor del set de entrenamiento es de 7,3 % y de prueba de 9,5 % (Tabla 1); en Alonso (2021) se aceptan modelos con porcentaje de error de 2,4 %, para entrenamiento y de 9,5 %, en set de prueba, así como de 2,2 y 8,1 %, respectivamente. Otro aspecto para considerar es el gráfico ACF, el cual, se encuentra cercano a cero, lo que indica que los residuos no se desviaron significativamente de un proceso de ruido blanco y son puramente aleatorios (Luis-Rojas *et al.* 2019), aspecto positivo para el modelo ajustado. Además, se considera el comportamiento de los residuos como parte de la valoración integral a realizar en la selección y ajuste de un modelo (Figura 4).

Este caso sugiere que las autocorrelaciones se encuentran dentro del intervalo de confianza. Además, se consideran las pruebas de los residuos Lilliefors, Box-Pierce y Ljung-box, en las cuales, se obtienen valores de *p-value* mayores que 0,05. El modelo seleccionado está compuesto de un coeficiente de media móvil (MA1), en la parte regular de la serie y dos coeficientes auto-regresivos (SAR1 y SAR2), así como dos de media móvil (SMA1 y SMA2). Se expone también el error estándar de cada uno (s.e.) (Tabla 1).

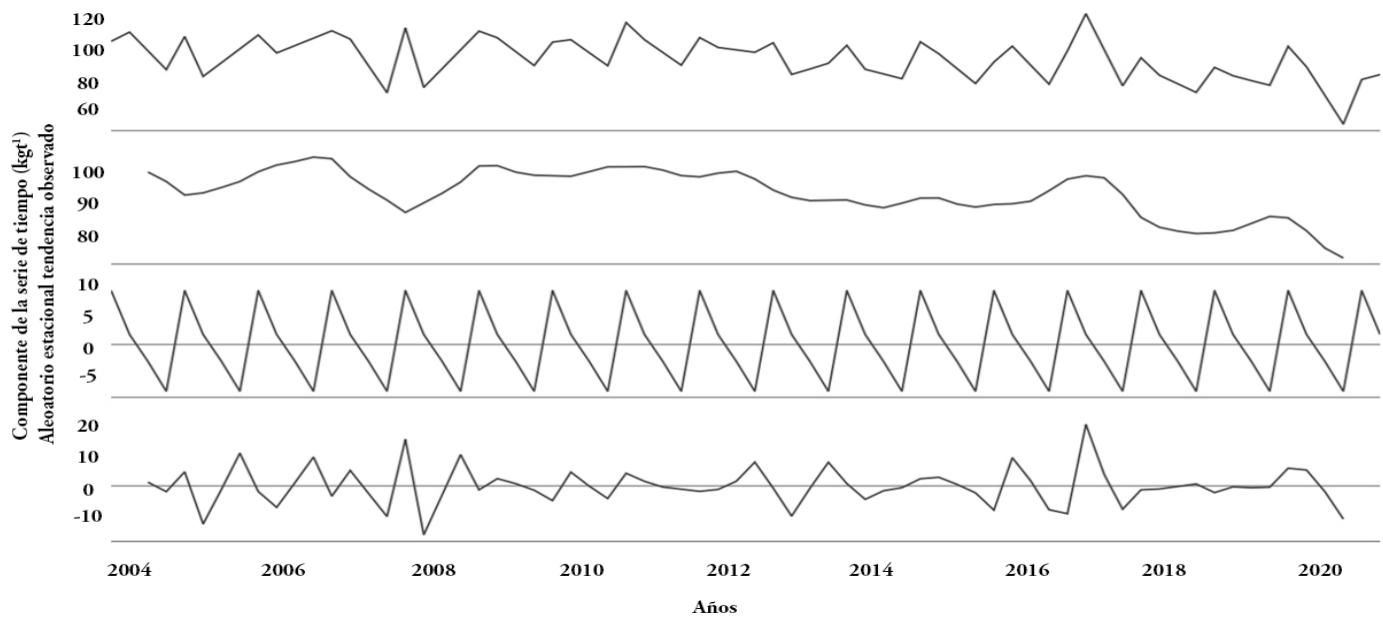


Figura 2. Descomposición de la serie de tiempo.

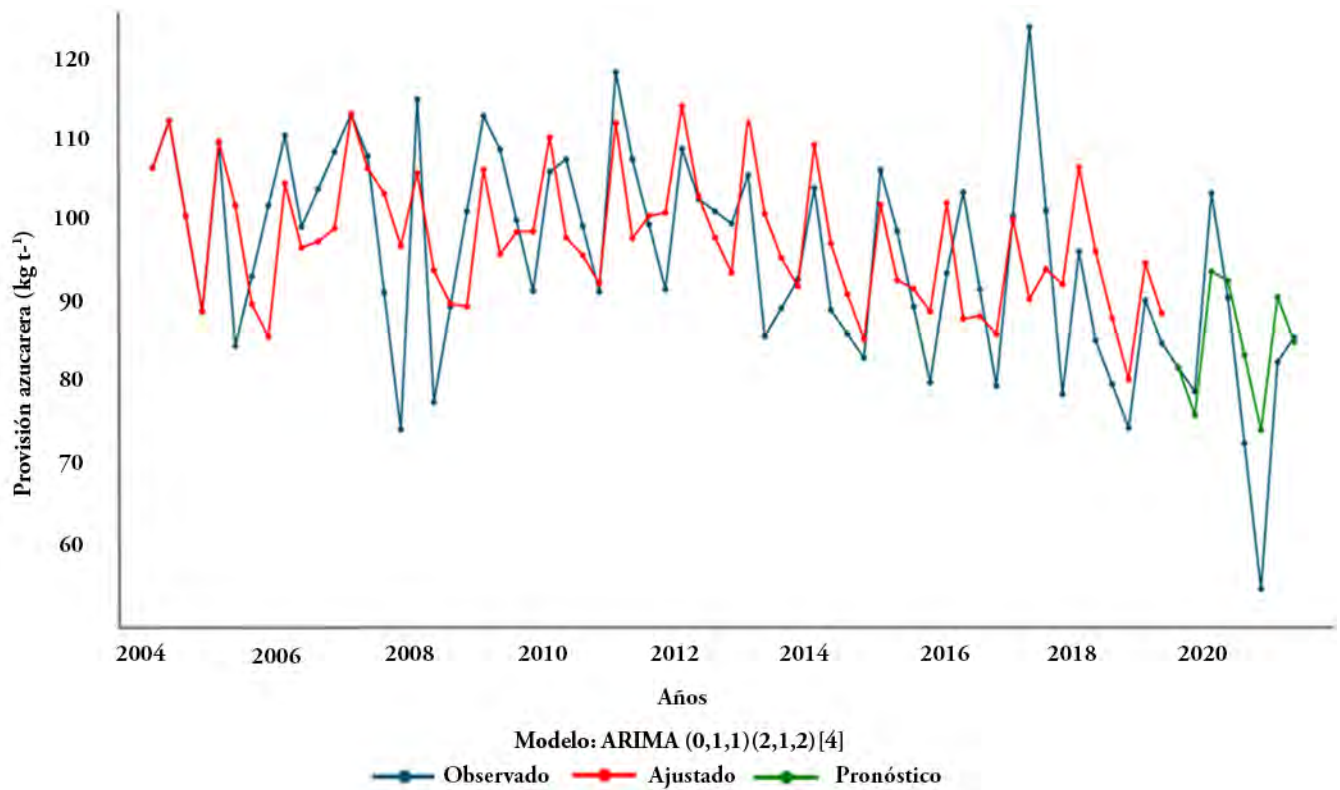


Figura 3. Modelado de la serie de tiempo.

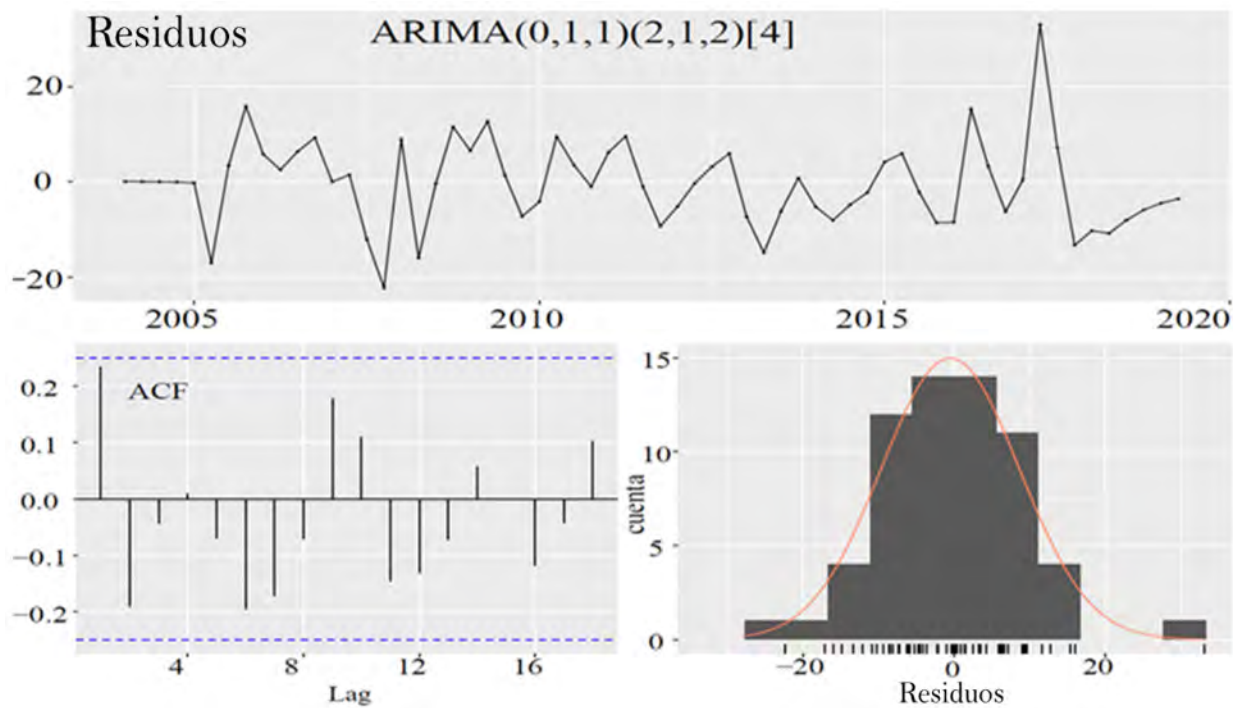


Figura 4. Comportamiento de los residuos del modelo ARIMA.

Tabla 1. Análisis de los residuos y coeficientes del modelo.

ARIMA (0,1,1)(2,1,2)[4]	Estadísticas del modelo					
	Set	ME	RMSE	MAE	MPE	MAPE
	Entrenamiento	-0,5	9,1	6,8	-1,3	7,3
	Prueba	-3,4	9,0	6,6	-6,0	9,5
	Test de los residuos					
	Test: Lilliefors	Test: Box-Pierce		Test: Ljung-Box		
	p-value = 0,85	p-value = 0,06		p-value = 0,05		
	Coeficientes del modelo					
		MA1	SAR1	SAR2	SMA1	SMA2
		-0,79	-0,79	-0,21	-0,14	-0,57
	s.e	0,19	0,34	0,18	0,34	0,30
	Sigma^2 estimado de 98,37: log likelihood de -213,04 Criterios: AIC=438,09 AICc=439,77 BIC=450,35					

Pronóstico de la provisión azucarera. Los resultados descritos en los epígrafes anteriores evidenciaron que la provisión azucarera no presenta un comportamiento homogéneo para cada uno de los días de zafra. En este trabajo, mediante el modelo ajustado de serie de tiempo, se realiza el pronóstico de la provisión azucarera hasta el 2025 (Figura 5).

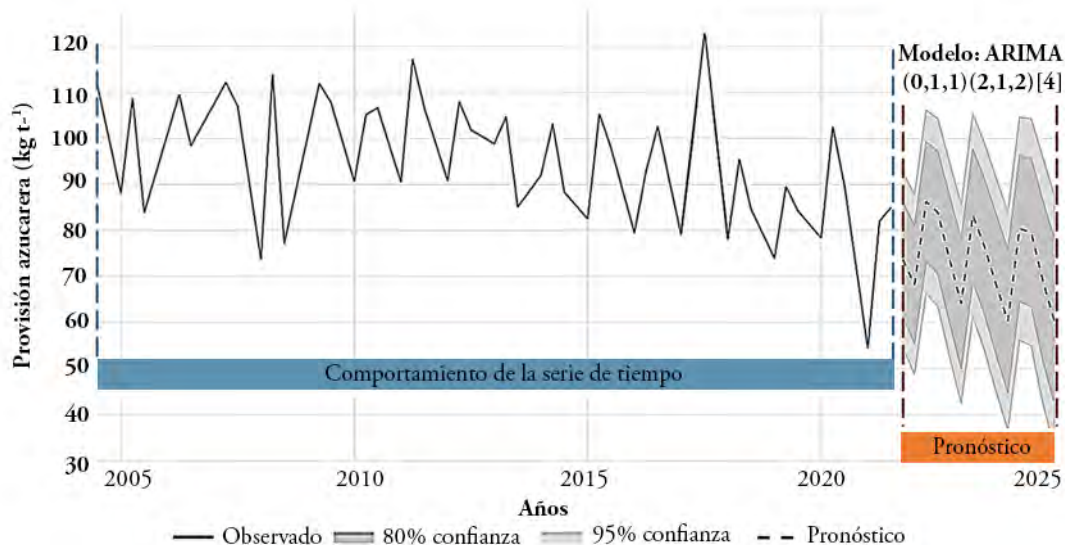


Figura 5. Pronóstico de la provisión azucarera según modelo propuesto en el caso de estudio.

El pronóstico del modelo presenta una tendencia a la disminución en la provisión azucarera de esta agroindustria, si persisten las dinámicas observadas. De acuerdo con Contreras Juárez *et al.* (2016), los pronósticos que se realizan mediante el uso de las series de tiempo tienen la premisa de que se mantendrá la tendencia encontrada, lo que permite obtener valores bastante precisos en el corto plazo. Por ello, el proceso de toma de decisiones debe considerar aspectos relacionados con las pérdidas de azúcar y sus variabilidades espaciotemporales, para hacer frente a esta tendencia.

Los pronósticos son utilizados en la agroindustria azucarera por diferentes autores, para prever escenarios y favorecer la toma de decisiones:

- En Hassan *et al.* (2019), se propone un modelo ARIMA (1, 2, 2), para el pronóstico de la producción de caña de azúcar en Bangladesh.
- En Mwanga *et al.* (2017), se ajustó un modelo ARIMA (2, 1, 2) (2, 0, 3) [4] al comportamiento del rendimiento de la caña de azúcar en Kenya y realizó un pronóstico para el período de 2015 a 2024.
- En Sanjeev *et al.* (2015), se encontró poca desviación entre el rendimiento predicho y el rendimiento real, lo que le permitió el uso de modelos ARIMA (0, 1, 1) y ARIMA (1, 1, 0), para conseguir pronósticos a corto plazo, en tres distritos productores, en Haryana, India.

Estos trabajos exponen los pronósticos enfocados en los rendimientos agrícolas de la caña de azúcar; sin embargo, como se aprecia en esta investigación, los modelos ARIMA también se pueden extender a la provisión final de la agroindustria azucarera, con el cumplimiento de los diferentes criterios de ajuste y validación, que son requeridos para las series de tiempo. Según Cabrera Milanés *et al.* (2015), la aplicación del control estadístico en un proceso puede ser efectivo

en la reducción de los costos durante la producción. También, Delgadillo-Ruiz *et al.* (2016) expresan que existe una mejora en la toma de decisiones, si emplean, de manera adecuada, las técnicas de pronóstico, lo que debe ser una alternativa para los planes de desarrollo futuros.

Como conclusión, el modelo ARIMA (0, 1, 1) (2, 1, 2) [4] se ajustó a la serie histórica del servicio de provisión azucarera y se cumplieron los criterios necesarios para su aceptación.

La obtención de un modelo válido y el pronóstico que este provee se presentó como una forma de valoración para conocer el comportamiento futuro, que puede tener la agroindustria azucarera.

El pronóstico expuesto recoge un comportamiento futuro con tendencia a la disminución, en la provisión azucarera, si persisten las mismas dinámicas; por ello, la toma de decisiones debe considerar el análisis de las causas que afectan la obtención de azúcar, para evitar esta tendencia.

Se hace importante que todos los actores que inciden en la producción, así como los que forman parte de los sistemas de medición y recopilación de datos reciban las capacitaciones pertinentes sobre uso de informaciones en la confección de modelos predictivos, formas de actuación para la mitigación de efectos no deseados y actúen en correspondencia con los resultados que son encontrados.

Es recomendable el empleo de sistemas de control estadístico y de pronósticos frecuentes, para una actualización, que permita predecir los escenarios futuros.

Conflictos de intereses: El manuscrito fue preparado y revisado con la participación de los autores y se declara que no existe conflicto de intereses que ponga en riesgo la validez de los resultados presentados. **Financiación:** La recopilación de datos y los análisis

proyecto: “Tecnologías para adecuar los manejos de suelo y cultivo a la variabilidad del sistema agroindustrial azucarero”, desarrollado por el Instituto de Investigaciones de la Caña de Azúcar en Matanzas, Cuba. Contribución de los autores: Yasmany García López: conceptualización, depuración de datos, análisis formal, investigación, validación, visualización, escritura, revisión y edición. Lourdes Yamen González Sáez: conceptualización, supervisión, metodología, revisión y edición. Juan Alfredo Cabrera Hernández: conceptualización, supervisión, metodología, revisión y edición

REFERENCIAS

- ADHIKARI, K.; HARTEMINK, A. 2016. Linking soils to ecosystem services. A global review. *Geoderma*. 262:101-111. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.009>.
- ALONSO, A. 2021. La predicción de series temporales mediante el modelo de regresión. *Anuario Jurídico y Económico Escurialense*. 54:261-280.
- AMARIS, G.; ÁVILA, H.; GUERRERO, T. 2017. Aplicación de modelo ARIMA para el análisis de series de volúmenes anuales en el río Magdalena. *Revista Tecnura*. 21(52):88-101. <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2017.2.a07>
- BURKHARD, B.; MAES, J. 2017. Mapping Ecosystem Services. Pensoft Publishers. Sofia. Bulgaria. 365p.
- CABRERA MILANÉS, A.; DE LA CRUZ RIVADENEIRA, O.; GÓMEZ AVILÉS, B.; RODRÍGUEZ BETANCOURT, R. 2015. Integración de métodos estadísticos y económicos para la gestión en el proceso industrial cubano del azúcar de caña. Caso de estudio. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad de Zulia*. 38(3):209-215.
- CHIANG GONZÁLEZ, J.; GONZÁLEZ MORALES, V.M.; REYES SÁNCHEZ, Y.; MIÑO VALDÉS, J. 2018. Influencia de las variedades de caña sobre la eficiencia industrial en la fábrica “14 de julio de Cienfuegos. Centro Azúcar. 45:41-49.
- CONTRERAS JUÁREZ, A.; ATZIRY ZUÑIGA, C.; MARTÍNEZ FLORES, J.; SÁNCHEZ PARTIDA, D. 2016. Análisis de series de tiempo en el pronóstico de la demanda de almacenamiento de productos perecederos. *Estudios Gerenciales*. 32:387-396. <https://doi.org/10.1016/j.estger.2016.11.002>
- COSTANZA, R.; D'ARGE, R.; DE GROOT, R.S.; FARBER, S.; GRASSO, M.; HANNON, B.; LIMBURG, K.; NAEEM, S.; O'NEILL, R.; 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. <http://doi.org/10.1038/387253a0>
- DE GROOT, R.; BRAAT, L.; COSTANZA, R. 2017. A short history of the ecosystem services concept. En: Burkhard, M. (eds.) *Mapping ecosystem services*. Pensoft Publishers. Sofia, Bulgaria. p.31-34.
- DELGADILLO-RUIZ, O.; RAMÍREZ-MORENO, P.P.; LEOS-RODRÍGUEZ, J.; SALAS GONZÁLEZ, J.M.; VALDEZ-CEPEDA, R.D. 2016. Pronósticos y series de tiempo de rendimientos de granos básicos en México. *Acta Universitaria*. 26(3). <http://doi.org/10.15174/au.2016.882>
- FERREIRA BOCCA, F.; ANTUNES RODRIGUES, L.H.; MODESTO ARRAES, N.A.M. 2015. When do I want to know and why? Different demands on sugarcane yield predictions. *Agricultural Systems*. 135:48-56. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agsy.2014.11.008>
- GARCÍA, Y.; GONZÁLEZ, L.Y.; CABRERA, J.A. 2022. Aplicaciones de aprendizaje automático para el análisis industrial de la provisión azucarera en Matanzas, Cuba. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica* 25(2):e2334. <http://doi.org/10.31910/rudca.v25.n2.2022.2334>
- GIL, V. 2016. Pronóstico de la demanda mensual de electricidad con series de tiempo. *Revista EIA*. 13 (26):111-120. <https://doi.org/10.24050/reia.v13i26.749>
- GRUNEWALD, K.; BASTIAN, O.; SYRBE, R.-U. 2015. Space and time aspects of ES. En: Grunewald, K.; Bastian, O. (Eds.) *Ecosystem Services - Concept, Methods and Case Studies* p.53-65. Berlin (Germany): Springer. <http://doi.org/10.1007/978-3-662-44143-5>
- HASSAN, Z.; SIRAJ-UD-DOULAH; HASAN, K. 2019. Forecasting the production of sugar cane based on time series models in Bangladesh. *Bulletin of mathematics and statistics research*. 7(4):24-32.
- HYNDMAN, R.; ATHANASOPOULOS, G.; BERGMEIR, C.; CACERES, G.; CHHAY, L.; O'HARA-WILD, M.; PETROPOULOS, F.; RAZBASH, S.; WANG, E.; YASMEEN, F. 2018. Forecast: Forecasting functions for time series and linear models. R package version 8.4. Disponible desde Internet en: <https://CRAN.R-project.org/package=forecast>
- ISTIFANUS, B.; EZEKIEL, A.M.; EZEANYA, N.C.; GAGARE, H.U. 2018. Prediction of sugar yield from sugar cane using process modelling. *International Journal of Research in Engineering and Technology*. 07(06). <https://doi.org/10.15623/ijret.2018.0706009>

- KRISPIN, R. 2020. TSstudio: functions for time series analysis and forecasting. R package version 0.1.6. Disponible desde Internet en: <https://CRAN.R-project.org/package=TSstudio>
- LUIS-ROJAS, S.; GARCÍA-SÁNCHEZ, R.; GARCÍA-MATA, R.; ARANA-CORONADO, O.; GONZÁLEZ-ESTRADA, A. 2019. Metodología Box - Jenkins para pronosticar los precios de huevo blanco pagados al productor en México. *Agrociencia*. 53(6): 911-925.
- MANLEY, K.; NYELELE, C.; EGOH, B.N. 2022. A review of machine learning and big data applications in addressing ecosystem service research gaps. *Ecosystem Services*. 57:101478. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2022.101478>
- MCGREE, S.; SCHREIDER, S.; KULESHOV, Y.; PRAKASH, B. 2020. On the use of mean and extreme climate indices to predict sugar yield in western Fiji. *Weather and Climate Extremes*. 29:100271. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2020.100271>
- MONTESPÁEZ, E.G.; CALVETE GONZÁLEZ, E.; ALFONSO, C. 2016. Aplicación de series de tiempo en la realización de pronósticos de producción. *Revista Fuentes*. 14(1):79-88. <https://doi.org/10.18273/revfue.v14n1-2016007>
- MWANGA, D.; ONG'ALA, J.; ORWA, G. 2017. Modeling sugarcane yields in the Kenya sugar industry: A SARIMA Model Forecasting Approach. *International Journal of Statistics and Applications*. 7(6):280-288. <http://doi.org/10.5923/j.statistics.20170706.02>
- OLIVENCIA POLO, F.; FERRERO BERMEJO, J.; GÓMEZ FERNÁNDEZ, J.F.; CRESPO MÁRQUEZ, A. 2020. Failure Mode Prediction and Energy Forecasting of PV Plants to Assist Maintenance Task by ANN Based Models. In: A. Márquez et al. (eds.), *Value Based and Intelligent Asset Management* p.187-209. Switzerland: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-20704-5_9
- R CORE TEAM. 2019. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. Disponible desde Internet en: <https://www.R-project.org/>
- RAMASUBRAMANIAN, K.; SINGH, A. 2019. Machine learning using R: With time series and industry-based use cases in R. Second Edition. Springer. New York, USA. <https://doi.org/10.1007/978-1-4842-4215-5>
- RINCÓN-RUIZ, A.; ECHEVERRY-DUQUE, M.; PIÑEROS, A.M.; TAPIA, C.H.; DAVID, A.; ARIAS-ARÉVALO, P.; ZULUAGA, P.A. 2014. Valoración integral de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos: Aspectos conceptuales y metodológicos. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá, Colombia. 151p.
- RUIZ LÓPEZ, H.R. 2018. Pronóstico de las exportaciones del cacao ecuatoriano para el 2018 con el uso de modelos de series de tiempo. *INNOVA Research Journal*. 3(6):9-20. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6778620>
- SANJEEV, VERMA, U.; TONK, M. 2015. Time-series modelling for sugarcane yield estimation in Haryana. *International Journal of Applied Mathematics and Statistical Sciences (IJAMSS)*. 4(6):53-62.
- SCHMITZ, A.; ZHANG, F. 2019. The Dynamics of sugarcane and sugar yields in Florida: 1950–2018. *Crop science*. 59:1880-1886. <https://doi.org/10.2135/cropsci2018.11.0674>
- WAWERU, P.; BURKHARD, B.; MULLER F. 2016. A review of studies on ecosystem services in Africa. *International Journal of Sustainable Built Environment*. 5:225-245. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2016.08.005>



Uso equivalente de la tierra e índices de crecimiento y eficiencia fisiológica en cultivos intercalados de yuca, maní y maíz

Equivalent land use and growth rates and physiological efficiency in intercropped cassava, peanut and corn

Diana María Sánchez-Olaya^{1*} ; Daniela Fernanda Bautista-Bohórquez² ; Karla Vanessa Cabrera-Parra²

¹Universidad de la Amazonia. Grupo de Investigación en Agroecología y Desarrollo Rural – GIADER. Florencia - Caquetá, Colombia; e-mail: dia.sanchez@udla.edu.co

²Universidad de la Amazonia. Facultad de Ingeniería. Florencia - Caquetá, Colombia; e-mail: da.bautista@udla.edu.co; karl.cabrera@udla.edu.co

*autor de correspondencia: dia.sanchez@udla.edu.co

Cómo citar: Sánchez-Olaya, D.M.; Bautista-Bohórquez, D.F.; Cabrera-Parra, K.V. 2024. Uso equivalente de la tierra e índices de crecimiento y eficiencia fisiológica en cultivos intercalados de yuca, maní y maíz. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 27(2):e2603. <http://doi.org/10.31910/rudca.v27.n2.2024.2603>

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 10 de 2024

Aceptado: diciembre 3 de 2024

Editado por: Helber Adrián Arévalo Maldonado

RESUMEN

Los cultivos intercalados ofrecen beneficios significativos para la agricultura, al fijar nitrógeno, proteger contra plagas y enfermedades y optimizar la producción. En este sentido, se analizó el efecto de los cultivos intercalados y unicultivos de yuca, maní y maíz, sobre los índices de crecimiento y uso equivalente de la tierra (UET). Los resultados mostraron que la yuca presentó una mayor tasa de crecimiento absoluto en los cultivos intercalados en comparación con el unicultivo, a las 12, 24 y 36 semanas después de la siembra (SDS). Por otro lado, el maní mostró los mayores valores de la tasa relativa de crecimiento a las 4 SDS y disminuyó a lo largo del tiempo. En cuanto al maíz, el unicultivo tuvo una tasa de asimilación neta más alta, desde las 4 SDS hasta las 12 SDS. En términos del UET, el sistema de cultivo maíz y yuca resultó ser el más eficiente, con un valor de 1,30, seguido del cultivo intercalado de yuca, maní y maíz con 1,24, indicando un uso óptimo de la tierra y una mayor producción de los cultivos; en contraste, el cultivo intercalado de maní y maíz fue el menos eficiente, con 0,59, valor inferior al UET de los unicultivos. Los cultivos intercalados de yuca, maní y maíz tienen el potencial de estimular el crecimiento, mejorar la eficiencia fisiológica y optimizar el uso de la tierra en comparación con los unicultivos, siempre y cuando se planifiquen adecuadamente, para aprovechar las interacciones beneficiosas entre las especies.

Palabras clave: Agricultura sostenible; Eficiencia de uso; Rendimiento de cultivos; Seguridad alimentaria; Sistemas de cultivo.

ABSTRACT

Intercropping offers significant benefits for agriculture by fixing nitrogen, protecting against pests and diseases, and optimizing production. In this sense, the effect of intercropping and uni-cultivation of cassava, peanut, and corn on growth rates and equivalent land use (ELU) was analyzed. The results showed that cassava presented a higher absolute growth rate in intercropping compared to uni-cultivation at 12, 24, and 36 weeks after planting (WAP). On the other hand, peanut showed the highest values of relative growth rate at 4WAP and decreased over time. As for corn, uni-cultivation had a higher net assimilation rate from 4 WAP to 12 WAP. In terms of ELU, the maize-cassava intercropping system was the most efficient, with a value of 1.30, followed by the intercropping of cassava, peanut, and maize with 1.24, indicating optimal land use and higher crop production; in contrast, the intercropping of peanut and maize was the least efficient, with 0.59, a value lower than the ELU of the uni-cultivars. The intercropping of cassava, peanut, and maize has the potential to stimulate growth, improve physiological efficiency, and optimize land use compared to uni-cultivation, provided it is properly planned to take advantage of beneficial interactions between species.

Keywords: Crop yield; Cropping systems; Food security; Sustainable agriculture; Use efficiency.

INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia, la agricultura ha desempeñado un papel crucial al transformar los estilos de vida y la capacidad de supervivencia (Tamayo Ortiz & Alegre Orihuela, 2022). Con el tiempo, las técnicas agrícolas han evolucionado, generando mejoras en la eficiencia y la diversidad de cultivos, por ejemplo, los mayas e incas solían combinar el maíz con frijoles o calabazas en sus campos, obteniendo beneficios, como la fijación de nitrógeno y la protección contra plagas (El-Mehy *et al.* 2023); sin embargo, en la edad media europea, los agricultores adoptaron la rotación de cultivos, para mantener la fertilidad del suelo y prevenir enfermedades específicas de las plantas (Shah *et al.* 2021).

Por otro lado, los cultivos intercalados promueven la diversidad vegetal en un área, fortaleciendo la resistencia del ecosistema agrícola (Ruiz *et al.* 2015; Castillo *et al.* 2022). El manejo de esta práctica facilita la recuperación de los cultivos frente a plagas y condiciones climáticas extremas (Martínez Díaz, 2019; Gómez-Camperos *et al.* 2021), ayudando a los cultivadores a estabilizar la producción agrícola y disminuir la dependencia de productos químicos en la agricultura, así como mejorar la calidad del suelo y distribuir la materia orgánica, mediante la inclusión de leguminosas en el ecosistema (Bover-Felices & Suárez-Hernández, 2020).

La conservación de la biodiversidad y la mejora de la salud del suelo, a través de los cultivos intercalados, pueden ser una herramienta valiosa para abordar varios objetivos de desarrollo sostenible (ODS) (Ramos Torres, 2021), tales como la erradicación de la pobreza, la mejora de la salud y la promoción de la igualdad de género, con el fin de fomentar una producción y consumo responsables y tomar medidas para abordar el cambio climático (Rodrigo-Cano *et al.* 2019). De esta manera, los cultivos intercalados benefician a los agricultores al maximizar el uso de la tierra y reducir los costos de producción, lo que, a su vez, genera ingresos para las familias dedicadas a la producción de alimentos, a pequeña escala (Nicholls & Altieri, 2018).

En consecuencia, los cultivos intercalados son una estrategia agrícola, que implica alternar diferentes especies de cultivos en el mismo terreno (Arenas Salazar *et al.* 2024); por ejemplo, la yuca (*Manihot esculenta* L.), una planta resistente y productiva, capaz de prosperar, incluso, en suelos pobres, es una fuente esencial de carbohidratos en las regiones tropicales (Santos *et al.* 2019); el maní (*Arachis hypogaea* L.), una leguminosa rica en proteínas y grasas saludables es primordial para garantizar la seguridad alimentaria y mantener la fertilidad del suelo (Montero, 2020) y el maíz (*Zea mays* L.) desempeña un papel fundamental, tanto en la alimentación humana como en diversas industrias y su versatilidad le permite adaptarse a diferentes condiciones agroecológicas, convirtiéndolo en un pilar económico, para las familias rurales (Shiferaw *et al.* 2011; Solano, 2021).

Por ende, estos cultivos no solo son valiosos nutricional y económicamente, sino que, también, son fundamentales para promover sistemas agrícolas sostenibles (FAO, 2021). Su diversidad genética y capacidad de adaptación fortalecen la resiliencia ante desafíos, como el cambio climático y las enfermedades (León, 2010). Al integrar estos cultivos en sistemas agroforestales es posible promover la salud del suelo, preservar los recursos hídricos y la diversidad biológica, así como

mitigar la erosión del suelo y disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero (Palacios & Mavisoy, 2020).

Por lo tanto, el objetivo del presente estudio fue analizar los efectos de los cultivos intercalados y unicultivos de yuca, maní y maíz, sobre los índices de crecimiento y eficiencia fisiológica; además, se evaluó la eficiencia biológica y la capacidad competitiva de los cultivos asociados, mediante el uso equivalente de la tierra (UET). Este estudio es relevante para los agricultores, dado que proporciona información sobre el crecimiento, desarrollo y producción de especies agrícolas en diferentes sistemas de cultivo y la optimización en el uso del suelo, para aumentar la eficiencia y competitividad, al promover la adopción de prácticas agrícolas sostenibles.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio. El ensayo se realizó en el Centro de Investigaciones Amazónicas Macagual (CIMAZ), ubicado a 20 km de Florencia, al sur del departamento del Caquetá, localizado geográficamente en el noroccidente de la Amazonia colombiana, con coordenadas 1°30'4.39" N y 75°39'44.8" O, a una altitud de 250 m s.n.m. y corresponde a la zona de vida de bosque húmedo tropical (bh-T) (García-Rincón *et al.* 2021) (Figura 1). El clima se caracteriza por presentar una humedad relativa de 85,1 %, temperatura media de 24 °C, precipitación media anual de 3.695 mm y un fotoperiodo de 4,6 horas día⁻¹. Tiene suelos muy evolucionados, con alto contenido de hierro y aluminio y con pH inferior a 4,6 (Aldana García *et al.* 2021).

Diseño experimental y tratamientos evaluados. Se realizó un diseño de bloques completamente aleatorizado, con seis tratamientos y cinco réplicas. El área de las parcelas fue de 50 m² (5 m de ancho x 10 m de largo). Cada tratamiento incluyó diferentes cantidades de plantas de yuca, maní y maíz; además, se estableció un grupo de control, que correspondía a cada cultivo en unicultivo.

Los tratamientos evaluados fueron: 1) unicultivo de yuca (U-Yuca), con una densidad de 10.000 plantas ha⁻¹; 2) cultivo intercalado de yuca, maní y maíz (Y-M-M), con una densidad de 6.000, 18.400 y 19.200 plantas ha⁻¹, respectivamente; 3) unicultivo de maní (U-Maní), con una densidad de 73.600 plantas ha⁻¹; 4) cultivo intercalado de maní y maíz (M-M), con una densidad de 46.000 y 28.800 plantas ha⁻¹, respectivamente; 5) unicultivo de maíz (U-Maíz), con una densidad de 28.800 plantas ha⁻¹ y 6) cultivo intercalado de maíz y yuca (M-Y), con una densidad de 28.800 y 10.000 plantas ha⁻¹, respectivamente.

De acuerdo con lo anterior, para establecer las densidades en los tratamientos se basó en optimizar la eficiencia en el uso de recursos, como nutrientes, luz y agua y mejorar la productividad, tanto en cultivos intercalados como en unicultivos (Vélez-Vargas *et al.* 2007; Altieri, 2010). En los cultivos intercalados, como el de yuca, maní y maíz, se ajustaron densidades para favorecer la complementariedad: la yuca, mejora la estructura del suelo; el maní, fija nitrógeno y el maíz, utiliza eficientemente el nitrógeno (Delaquis *et al.* 2018; Dong *et al.* 2022). En los unicultivos las densidades se establecieron, de acuerdo con la recomendaciones agronómicas que maximizan la productividad y cobertura del suelo (Xia *et al.* 2019; Cenóz *et al.* 2010; Onasanya *et al.* 2021).

Manejo del sitio y el establecimiento de cultivos. La preparación de terreno se realizó de manera manual utilizando un azadón, seguido por la creación de surcos, de acuerdo con cada uno de los tratamientos evaluados, dispuestos perpendicularmente a la superficie del campo (Aguilar, 2017). Para mantener el suelo en condiciones óptimas, se realizó la eliminación manual de malezas cada 30 días, para evitar su crecimiento excesivo (Šikuljak *et al.* 2023).

Se emplearon las variedades nativas conocidas, como maní var. rojo (similar al tipo valencia) y yuca var. quindiana; se utilizó la variedad certificada de maíz ICA V-105. En cuanto a la siembra, se plantaron dos semillas por sitio para el maíz y el maní, a una profundidad de 2 a 3 cm; para la yuca, se utilizó un corte de tallo de 0,25 m de largo con tres brotes y se plantó a una profundidad de 5 a 10 cm (Sánchez Olaya *et al.* 2023).

Se realizaron monitoreos regulares de plagas y de enfermedades en los tres cultivos para detectar y abordar posibles amenazas a su salud y producción (Varón de Agudelo *et al.* 2022). Como medida preventiva, se aplicó caldo bórdeles al 1 % y caldo sulfocálcico al 1,5 %; además, se implementaron bandas de color amarillo impregnadas con aceite y miel, para atrapar plagas (Cabrera Marulanda *et al.* 2018).

Mediciones de crecimiento. Se llevaron a cabo mediciones específicas para la yuca, el maní y el maíz, que incluyeron: a) *área foliar*, que

consistió en seleccionar las hojas más representativas de cada cultivo y se colocaron sobre una hoja de papel blanca, con una escala de 10 cm y fueron fotografiadas para su análisis, mediante el software especializado ImageJ (Martin *et al.* 2020); b) *área del suelo*, se calculó mediante la subdivisión en cuadrantes y, en cada uno de ellos, se midieron las dimensiones de largo y de ancho, para luego sumarlas (Suárez-Londoño *et al.* 2017); c) *peso seco*, que consistió en secar todas las partes de las plantas de cada uno de los cultivos y, para ello, se tomó cada muestra en bolsas de papel y se llevó al horno para secar, a una temperatura de 60 °C, hasta que las muestras alcanzaron peso constante y éste se registró en una balanza de precisión de 0,01 g. Las mediciones se realizaron en 10 plantas de maní y de maíz y en 5 plantas en yuca seleccionadas al azar por parcela, a la 4, 6, 8 y 12 semanas después de la siembra (SDS). Con las mediciones de crecimiento, se determinó los índices de crecimiento, relacionados en la tabla 1.

Cosechas finales y evaluaciones de rendimiento. La yuca se cosechó a las 52 SDS. Las plantas de yuca ubicadas en las hileras de las parcelas fueron extraídas manualmente del suelo; se evaluaron las raíces comerciales de reserva, que tenían un diámetro superior a 1,5 cm y estaban libres de enfermedades o deterioro; estas raíces frescas se pesaron en una báscula digital con precisión de 100 g y los resultados se expresaron en kg ha⁻¹ (Howeler, 2014; Samidjo & Sarjiyah, 2020).

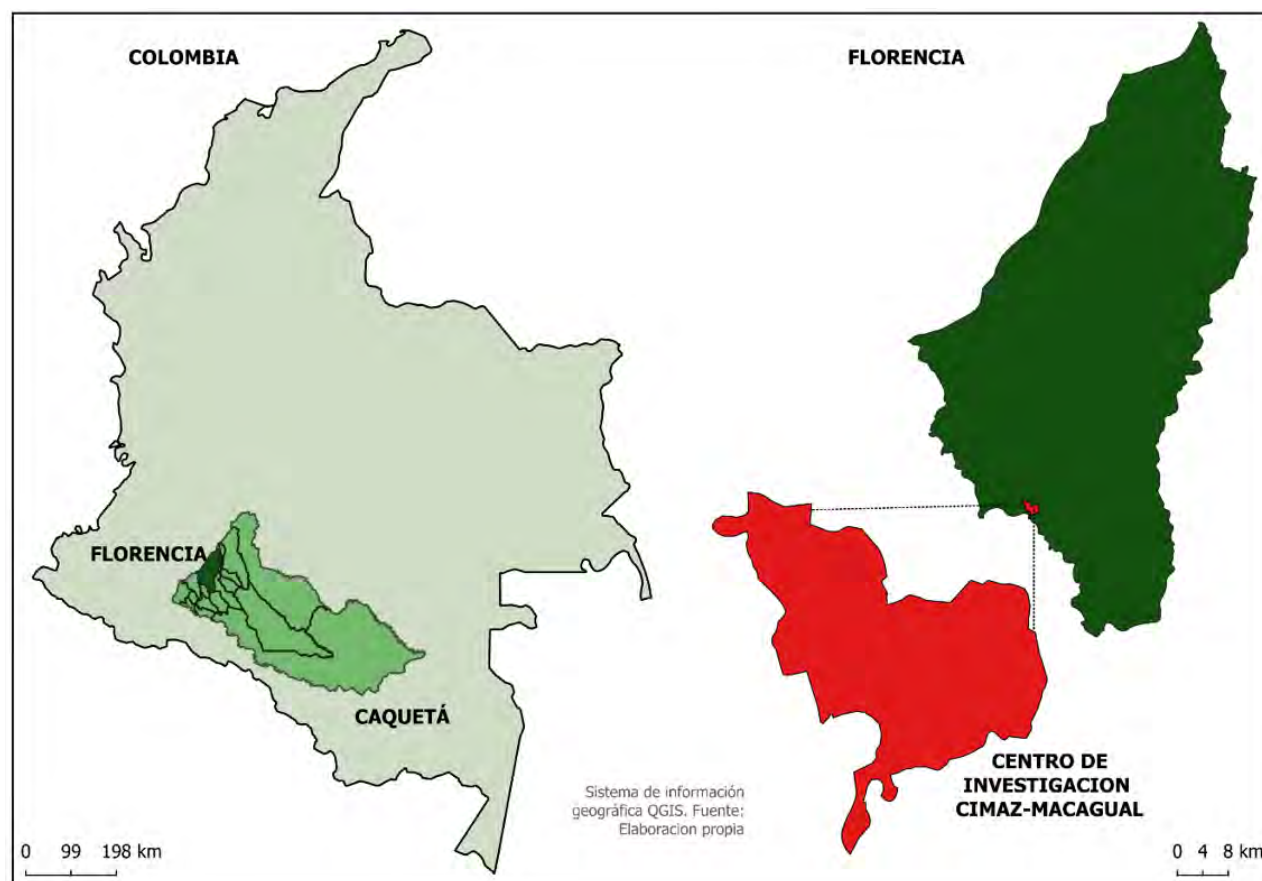


Figura 1. Localización geográfica del área de estudio, en el Centro de Investigaciones Amazónicas Macagual (CIMAZ), Caquetá, Colombia.

Tabla 1. Índices de crecimiento determinados en el estudio.

Índice de crecimiento	Unidad de medida	Fórmulas
Tasa de Crecimiento Absoluta (TCA)	g día ⁻¹	$\frac{W_2 - W_1}{t_2 - t_1}$
Tasa Relativa de Crecimiento (TRC)	g g ⁻¹ día ⁻¹	$\frac{\ln W_2 - \ln W_1}{t_2 - t_1}$
Tasa de Asimilación Neta (TAN)	g cm ² día ⁻¹	$\frac{(W_2 - W_1)(LA_2 - LA_1)}{(\ln LA_2 - \ln LA_1)(t_2 - t_1)}$

Ln: logaritmo natural; W₁ y W₂: peso seco 1 y 2; t₁ y t₂: tiempo 1 y 2; LA₁ y LA₂: área foliar 1 y 2.

El maní se cosechó entre las 18 y 20 SDS. El rendimiento en grano del cultivo se obtuvo al momento de la cosecha, tomando las plantas de una superficie de un metro cuadrado y considerando el peso de semilla sin vainas, registrado en una balanza analítica 0,01 g. Los rendimientos de grano de maní se expresaron en kg ha⁻¹ (Canavar & Kaynak, 2008).

El maíz se cosechó entre las 16 y 18 SDS. Se contabilizaron las plantas y se retiraron las mazorcas de todas las plantas en las parcelas; las mazorcas recolectadas se pesaron en una báscula digital con precisión de 100 g y los rendimientos de grano de maíz, se expresaron en kg ha⁻¹ (Kirouani *et al.* 2023).

Uso equivalente de la tierra (UET). Para determinar el UET se consideró el rendimiento obtenido para cada cultivo en unicultivo e intercalado. El cálculo del UET para el cultivo intercalado de yuca, maní y maíz (Y-M-M), se realizó mediante la ecuación 1; para el cultivo intercalado de maní y maíz (M-M), con la ecuación 2 y cultivo intercalado de maíz y yuca (M-Y), con la ecuación 3 (Gómez Betancur *et al.* 2018).

$$UET_{Y-M-M} = \frac{I_y}{U_y} + \frac{I_m}{U_m} + \frac{I_{mz}}{U_{mz}} \quad \text{ecuación 1}$$

$$UET_{M-M} = \frac{I_m}{U_m} + \frac{I_{mz}}{U_{mz}} \quad \text{ecuación 2}$$

$$UET_{M-Y} = \frac{I_y}{U_y} + \frac{I_{mz}}{U_{mz}} \quad \text{ecuación 3}$$

Donde:

I_y: rendimiento de la yuca en cultivo intercalado.

U_y: rendimiento de la yuca en unicultivo.

I_m: rendimiento del maní en cultivo intercalado.

U_m: rendimiento del maní en unicultivo.

I_{mz}: rendimiento del maíz en cultivo intercalado.

U_{mz}: rendimiento del maíz en unicultivo.

Para la variable UET, valores < 1, significa que el cultivo intercalado no produjo más que los unicultivos por unidad de área; valores = 1, indica que la producción por unidad de área es igual en ambos sistemas de cultivo y valores > 1, denota que el cultivo intercalado es más productivo que cualquier unicultivo (Ruiz-González & Victorino-Ramírez, 2015; Gómez Betancur *et al.* 2018).

Análisis estadístico. Se ajustó un modelo lineal general y mixto, con el método de estimación de máxima verosimilitud restringida (REML), donde los tratamientos y el tiempo representado en SDS se seleccionaron como factor fijo y las repeticiones, se incluyeron como factor aleatorio. Para cada uno de los modelos estimados, se evaluaron los supuestos de normalidad y homogeneidad y se realizó la prueba de comparación de medias LSD Fisher ($\alpha=0,05$). Los análisis estadísticos se desarrollaron en el software InfoStat versión 2020 con la interfaz de R.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Yuca. Al evaluar la TCA, se encontró que el cultivo intercalado de yuca, maní y maíz (Y-M-M) presentó una TCA más alta, alcanzando un valor de 17,5 g día⁻¹ a las 36 SDS (Figura 2a), seguido del cultivo intercalado de yuca y maíz (M-Y), que presentó una TCA máxima de 12,3 g día⁻¹; por último, el unicultivo de yuca, que presentó los valores más bajos desde las 8 hasta las 36 SDS. La alta TCA registrada en Y-M-M sugiere una eficiencia notoria en el aprovechamiento de recursos; esta eficiencia podría ser el resultado de la complementariedad en la utilización de recursos en el tiempo o en el espacio entre los tres cultivos en este sistema (Pereyra *et al.* 2019).

En cultivos intercalados, como Y-M-M, cada cultivo puede desempeñar un papel único en la optimización de la utilización de los recursos disponibles en el suelo; por ejemplo, la yuca, con sus raíces profundas y sistema radicular extenso, puede aprovechar los nutrientes más profundos del suelo (Arias-Collaguazo *et al.* 2021), mientras que el maíz, con su crecimiento vertical, puede aprovechar la luz solar en diferentes niveles del dosel vegetal (Albino-Garduño *et al.* 2015; Tapia-Hernández *et al.* 2024); además, el maní, siendo una leguminosa, puede fijar nitrógeno atmosférico, enriqueciendo el suelo y beneficiando el crecimiento de los otros cultivos (Liu *et al.* 2020). Esta sinergia en la utilización de recursos puede potenciar el crecimiento y el desarrollo de los cultivos individuales dentro del sistema Y-M-M, contribuyendo a la alta TCA.

En cuanto a la TRC, en el unicultivo (U-Yuca), se observa la TRC más alta en comparación con los cultivos intercalados, a partir de las 8 SDS, con un valor $0,082 \text{ g día}^{-1}$ (Figura 2b), lo que indica que la yuca en unicultivo experimenta un incremento de materia seca más veloz con respecto al tiempo y se puede atribuir al ser el único cultivo; puede aprovechar todos los recursos disponibles sin competencia, lo que promueve un crecimiento óptimo (Mbanjo *et al.* 2021). En contraste, los cultivos intercalados de maíz y yuca (M-Y), yuca, maní y maíz (Y-M-M) muestran una TRC que aumenta gradualmente con el tiempo, aunque su ritmo de crecimiento es inferior al de U-Yuca, lo que sugiere que la presencia concurrente de maíz y de maní puede estar limitando el crecimiento de la yuca, debido a una competencia intensificada por los recursos disponibles. La interacción entre cultivos, como M-Y y Y-M-M, desempeña un papel crucial en el crecimiento de la yuca; por ejemplo, ciertos cultivos pueden proporcionar sombra, como el maíz, debido a su crecimiento vertical y por sus hojas anchas y altas, lo que ayuda a reducir el estrés térmico en la yuca; por su parte, en unicultivos donde la yuca se cultiva exclusivamente, no hay competencia con otros cultivos por recursos, como luz, agua y nutrientes, lo que puede explicar una TRC alta (Colina *et al.* 2020). Además, las condiciones ambientales, como la temperatura, la humedad y la calidad del suelo, ejercen una influencia significativa en la tasa de crecimiento de la yuca. La yuca exhibe una notable capacidad para prosperar en condiciones adversas, incluyendo, suelos ácidos y de baja fertilidad, así como en áreas con precipitaciones esporádicas o prolongados períodos de sequía (Santos *et al.* 2019).

El cultivo intercalado de yuca, maní y maíz (Y-M-M) exhibe la mayor TAN a partir de las 12 SDS, obteniendo un valor de $0,057 \text{ g cm}^2 \text{ día}^{-1}$, a las 36 SDS (Figura 2c), lo que sugiere una notable eficiencia fotosintética alta, posiblemente, atribuida a la diversidad de cultivos en este sistema. Esta diversidad puede facilitar una mejor utilización de los recursos disponibles (Brestič *et al.* 2021). Por otro lado, el cultivo intercalado de yuca y maíz (Y-M) presenta un incremento menor a las 36 SDS, con $0,026 \text{ g cm}^2 \text{ día}^{-1}$, en comparación con los demás tratamientos. La variabilidad en la TAN de la yuca en diferentes sistemas de cultivo se debe a una interacción compleja de factores biológicos y ambientales (Adu *et al.* 2018). En los cultivos intercalados, la diversidad de cultivos puede mejorar la disponibilidad de nutrientes y agua en el suelo, lo que favorece un mayor crecimiento y desarrollo de la yuca, aumentando su TAN (Abrell *et al.* 2022). Además, estas asociaciones pueden promover interacciones beneficiosas entre plantas, como la fijación de nitrógeno, por parte del maní, que beneficia el crecimiento de la yuca (Sánchez Olaya *et al.* 2023). El manejo del cultivo y las condiciones ambientales específicas de cada sistema también influyen en la TAN, destacando la importancia de estrategias de manejo integradas y adaptativas, para optimizar el rendimiento de la yuca, en diversos contextos agrícolas (Hussain *et al.* 2023).

Maní. El cultivo intercalado de maíz y maní (M-M) experimenta un aumento en la TCA a partir de las 4 SDS, con un valor inicial de $0,1 \text{ g día}^{-1}$; este incremento se mantiene hasta las 6 SDS, alcanzando un valor de $1,4 \text{ g día}^{-1}$ (Figura 3a). Por otro lado, todos los tratamientos presentan disminuciones a partir de las 8 SDS. La observación de

que el cultivo de maní alcanzó su máxima TCA a los 6 SDS sugiere una fase inicial de rápido crecimiento vegetativo, típica de la etapa de establecimiento activo de las plantas (Sadras *et al.* 2016). Los valores registrados de TCA para los diferentes sistemas de cultivo a las 6 SDS ($1,4 \text{ g día}^{-1}$, para M-M; $0,72 \text{ g día}^{-1}$, para U-Maní y $0,47 \text{ g día}^{-1}$ para Y-M-M) reflejan las diferencias en la eficiencia de crecimiento del maní en cada sistema. La disminución subsiguiente en la TCA, a medida que aumentan las SDS, indica la transición de las plantas hacia etapas de crecimiento más lentas, posiblemente, debido a factores, como la competencia por recursos, limitaciones ambientales y el agotamiento de reservas internas de nutrientes (Di Benedetto & Tognetti, 2016); de esta forma, la reducción de la TCA entre $0,3 \text{ g día}^{-1}$ y $0,1 \text{ g día}^{-1}$, a las 12 SDS, sugiere un ajuste en la fase de crecimiento de las plantas, donde los recursos se asignan a otras necesidades fisiológicas, como la formación de estructuras reproductivas o la acumulación de reservas (González & Fuentes, 2017).

El cultivo intercalado de yuca, maní y maíz (Y-M-M) presenta el máximo valor de TRC a las 4 SDS, con un valor de $0,12 \text{ g día}^{-1}$, seguido del unicultivo (U-Maní), con $0,14 \text{ g día}^{-1}$ (Figura 3b). Este índice disminuye rápidamente, según avanzan las semanas para todos los tratamientos, hasta alcanzar valores de hasta $0,01 \text{ g día}^{-1}$, a las 12 SDS. La disminución en la TRC se debe a que el maní crece rápidamente, dado que las plantas están en una fase de establecimiento activo (Lv *et al.* 2023). Conforme las plantas maduran, su TRC disminuye gradualmente, por la competencia por recursos, como nutrientes y espacio y por factores ambientales, como disponibilidad de agua y temperatura (Blanco-Valdés, 2019). En cultivos intercalados, como Y-M-M, donde el maní compite con otros cultivos, la disminución en la tasa de crecimiento puede ser más pronunciada, debido a una mayor competencia por recursos en comparación con el unicultivo, donde el maní no enfrenta tal competencia (Huss *et al.* 2022).

Con relación al unicultivo (U-Maní), se observa el mayor valor de TAN a las 4 SDS, con un valor de $0,002 \text{ g cm}^2 \text{ día}^{-1}$ (Figura 3c); sin embargo, este valor disminuye drásticamente hasta las 8 SDS, alcanzando un mínimo valor de $0,0004 \text{ g cm}^2 \text{ día}^{-1}$. En cuanto al cultivo intercalado de yuca, maní y maíz (Y-M-M), la TAN permanece constante con el tiempo, con una variación entre las 8 SDS, con un valor de $0,0004 \text{ g cm}^2 \text{ día}^{-1}$ hasta las 12 SDS, con un valor de $0,00035 \text{ g cm}^2 \text{ día}^{-1}$. El comportamiento observado en los sistemas de cultivo de maní se puede analizar considerando factores agronómicos y ambientales (De Santis *et al.* 2023). En el caso del U-Maní, donde se registra un descenso en la TAN, este fenómeno se atribuye a la competencia interna por recursos entre las plantas de maní, debido a que, al estar cultivadas únicamente plantas de maní, se genera una mayor competencia por nutrientes, agua y luz solar, lo que puede limitar el crecimiento individual de las plantas (Pedelini, 2008) y, por ende, reducir la TAN. En el caso del cultivo intercalado de Y-M-M, donde se observa la menor TAN, Reyes-Palomino & Cano Ccoa (2022) indican que la presencia de otros cultivos, como el maíz y la yuca, puede afectar la dinámica del nitrógeno en el sistema, lo que resulta en diferentes patrones de acumulación de TAN en comparación con el cultivo

exclusivo de maní y la interacción entre los diferentes cultivos y sus necesidades nutricionales, lo que puede influir significativamente en la disponibilidad y en la distribución del nitrógeno en el suelo

durante el ciclo de cultivo y, de esta manera, limitar el crecimiento del maní (Bianucci *et al.* 2018).

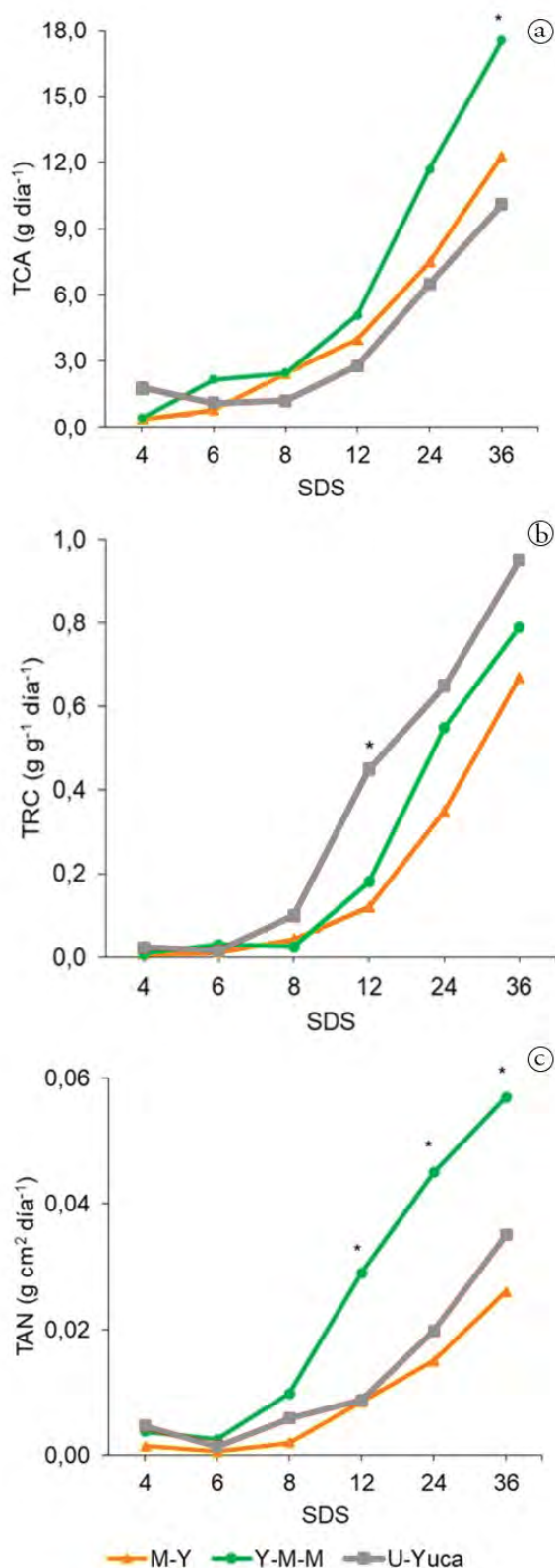


Figura 2. Efecto del unicultivo y cultivos intercalados con yuca sobre los índices de crecimiento. a) tasa de crecimiento absoluta (TCA); b) tasa relativa de crecimiento (TRC); c) tasa de asimilación neta (TAN). M-Y: Cultivo intercalado de maíz y yuca; Y-M-M: Cultivo intercalado de yuca, maní y maíz; U-Yuca: Unicultivo de yuca.

*Significativo para el día del muestreo según prueba de LSD Fisher ($\alpha=0,05$).

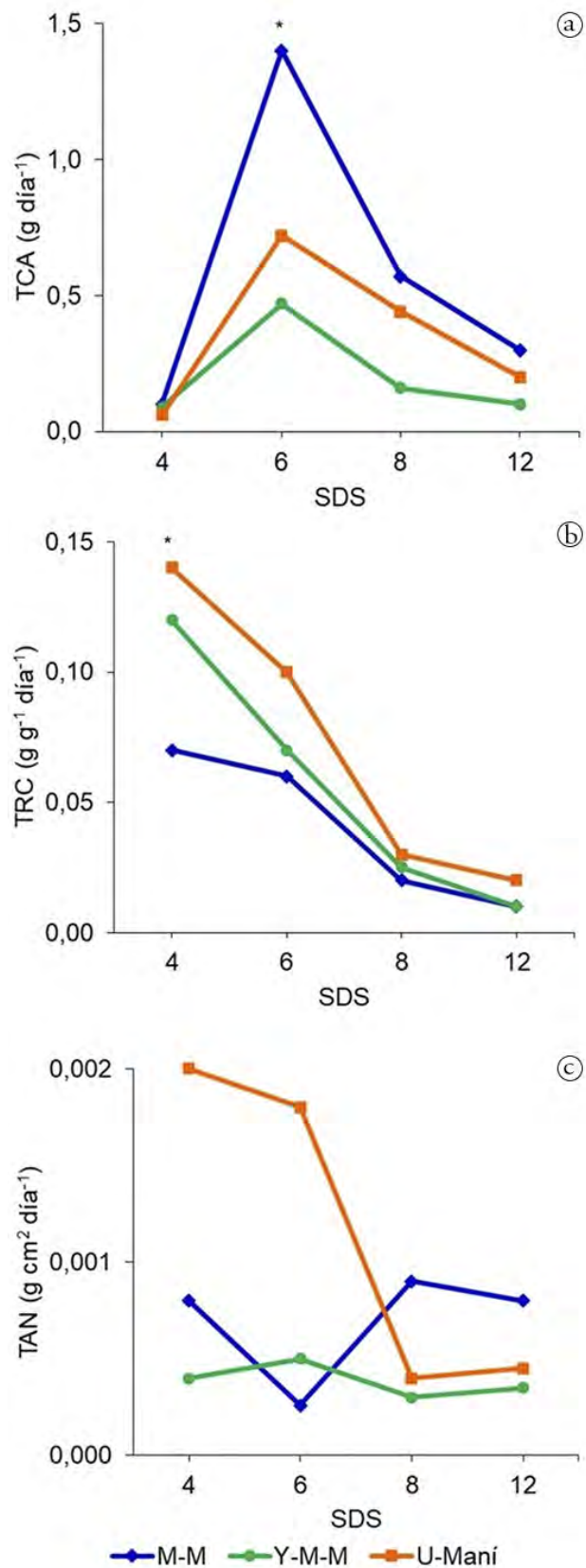


Figura 3. Efecto del unicultivo y cultivos intercalados con maní sobre los índices de crecimiento. a) tasa de crecimiento absoluta (TCA); b) tasa relativa de crecimiento (TRC); c) tasa de asimilación neta (TAN). M-M: Cultivo intercalado de maní y maíz; Y-M-M: Cultivo intercalado de yuca, maní y maíz; U-Mani: Unicultivo de maní.

*Significativo para el día del muestreo según prueba de LSD Fisher ($\alpha=0,05$).

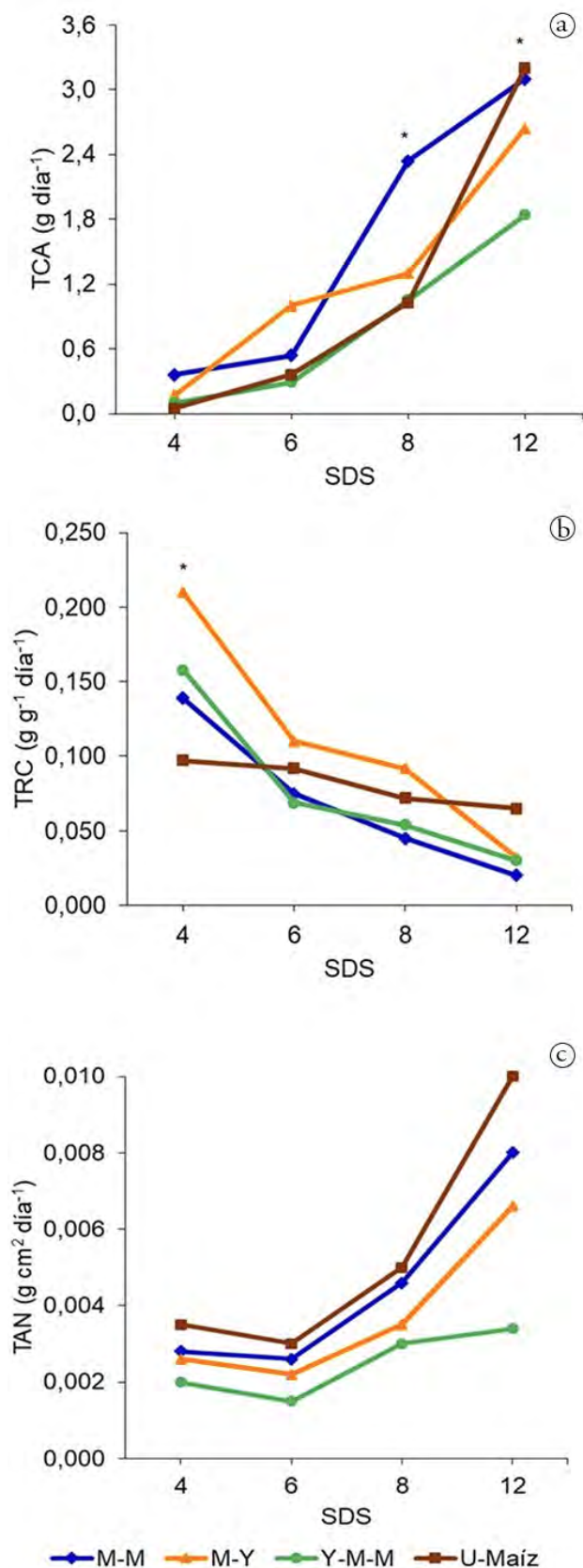


Figura 4. Efecto del unicultivo y cultivos intercalados con maíz sobre los índices de crecimiento. a) tasa de crecimiento absoluta (TAN); b) tasa relativa de crecimiento (TRC); c) tasa de asimilación neta (TAN). M-M: Cultivo intercalado de maní y maíz; M-Y: Cultivo intercalado de maíz y yuca; Y-M-M: Cultivo intercalado de yuca, maní y maíz; U-Maíz: Unicultivo de maíz.

*Significativo para el día del muestreo según prueba de LSD Fisher ($\alpha=0,05$).

Maíz. Se evidenció un aumento en la TCA respecto al tiempo en todos los tratamientos (Figura 4a). En el cultivo intercalado de maní y maíz (M-M) y el unicultivo (U-Maíz), se registró la mayor TCA a las 12 SDS, con valores de 3,1 y 3,2 g día⁻¹, respectivamente, mientras que la menor TCA se observó en el cultivo intercalado de yuca, maní y maíz (Y-M-M), con 1,84 g día⁻¹. La mayor TCA observada se debe a una óptima disponibilidad de recursos, como nutrientes, agua y luz solar, permitiendo al maíz aprovechar eficientemente estos recursos, sin la presencia de competidores directos (Zhang *et al.* 2020). Además, la presencia de maní en el cultivo intercalado con maíz (M-M), genera interacciones positivas, como la fijación de nitrógeno en el suelo o la reducción de la competencia por luz solar (Li *et al.* 2022). Este período coincide también con una fase de crecimiento activo del maíz, con una alta demanda de recursos para el desarrollo de hojas, tallos y raíces, contribuyendo a una TCA más alta (Delgado *et al.* 2015). Por otro lado, la menor TCA registrada en el cultivo intercalado Y-M-M corresponde a una competencia más intensa por recursos, como nutrientes, agua y luz solar, entre los múltiples cultivos presentes, así como a la interferencia de las raíces profundas y extensas de la yuca y el maní, que podrían limitar el acceso del maíz a estos recursos (Noriega-Navarrete *et al.* 2021).

Con relación a la TRC, el cultivo intercalado de maíz y yuca (M-Y) presentó la TRC más alta a las 4 SDS, con un valor de 0,21 g día⁻¹, posteriormente, disminuyó hasta las 12 SDS, con un valor de 0,032 g día⁻¹ (Figura 4b), al contrario del comportamiento observado en el unicultivo (U-Maíz), que obtuvo la menor TRC a las 4 SDS (0,097 g día⁻¹) y la mayor a las 12 SDS (0,065 g día⁻¹). La interacción entre cultivos en sistemas intercalados puede influir significativamente en

el crecimiento del maíz, debido a la competencia por recursos, como nutrientes, agua y luz solar (Guamán Guamán *et al.* 2020); por ejemplo, en el sistema maíz y yuca, la asociación con la yuca puede proporcionar una mayor disponibilidad de nutrientes o reducir la competencia por ellos, estimulando el crecimiento inicial del maíz (He *et al.* 2023); sin embargo, con el tiempo, esta competencia se puede intensificar, lo que podría contribuir a la disminución de la TRC, en comparación con el unicultivo (Adjei *et al.* 2023); además, la presencia de diferentes cultivos puede alterar las propiedades del suelo y aumentar la susceptibilidad a enfermedades y plagas, lo que puede afectar negativamente el crecimiento y la productividad del maíz en sistemas asociados (Noriega-Navarrete *et al.* 2021).

El unicultivo de maíz (Uni- Maíz) y el cultivo intercalado de maní y maíz (M-M) obtuvieron la TAN más alta respecto a los demás tratamientos y aumentó gradualmente hasta las 12 SDS, con un valor de 0,01 y 0,008 g cm² día⁻¹, respectivamente. Por su parte, el cultivo intercalado de yuca, maní y maíz (Y-M-M) presentó la menor TAN en comparación con los demás tratamientos (Figura 4c), siendo éste el sistema con la menor eficiencia fotosintética, debido a la intensa competencia por luz y nutrientes entre las especies, donde las diferencias en los requisitos de luz y nutrientes entre la yuca, el maní y el maíz contribuyeron a una disminución en la eficiencia fotosintética del maíz (Sánchez Torres *et al.* 2020; González & Fuentes, 2017). De esta forma, Bitew *et al.* (2021) indican que las diferencias morfofisiológicas y los factores agronómicos, también regulan la competencia entre los cultivos componentes, debido a los factores limitantes del crecimiento.

Tabla 2. Rendimiento y uso equivalente de la tierra (UET) en cada uno de los sistemas de cultivos evaluados.

Sistema de cultivo	Rendimientos absolutos (kg ha ⁻¹)			Rendimientos relativos			UET
	Yuca	Maní	Maíz	Yuca	Maní	Maíz	
M-M	-	19,6c	320b	-	0,19	0,40	0,59
M-Y	5120a	-	440ab	0,75	-	0,55	1,30
Y-M-M	3270a	49,5b	219b	0,48	0,49	0,27	1,24
U-Yuca	6812a	-	-	1,00	-	-	1,00
U-Maní	-	100,8a	-	-	1,00	-	1,00
U-Maíz	-	-	800a	-	-	1,00	1,00

M-M: Cultivo intercalado de maní y maíz; M-Y: Cultivo intercalado de maíz y yuca; Y-M-M: Cultivo intercalado de yuca, maní y maíz; U-Yuca: Unicultivo de yuca; U-Maní: Unicultivo de maní; U-Maíz: Unicultivo de maíz. Medias con una letra común no son significativamente diferentes según prueba de LSD Fisher (p>0,05).

Uso equivalente de la tierra (UET). Los cultivos intercalados de maíz y yuca (M-Y), yuca, maní y maíz (Y-M-M) presentaron los valores más altos de UET, con 1,30 y 1,24, respectivamente (Tabla 2), debido a las potenciales interacciones beneficiosas entre estos cultivos (He *et al.* 2023). Estas combinaciones pueden mejorar los nutrientes del suelo y la comunidad microbiana del suelo, aumentando la eficiencia en el uso de los recursos disponibles en el suelo (Negash & Mulualem, 2014).

En contraste, el cultivo intercalado de maíz y maní (M-M) obtuvo un menor valor a comparación de los unicultivos (0,59), lo que indica una menor eficiencia en el uso del suelo, debido a una competencia más directa por los recursos (Han *et al.* 2022). Zhang *et al.* (2024) señalan la importancia de la complementariedad de los sistemas radiculares, dado que al elegir cultivos que posean sistemas radiculares, que se desarrollen en diferentes profundidades y patrones, se puede aprovechar mejor el espacio y los nutrientes

disponibles en el suelo, lo que ayuda a evitar la competencia directa entre los cultivos por recursos, como el agua y los nutrientes, lo que podría comprometer el rendimiento y la salud de las plantas (Craine & Dybzinski, 2013).

Además, es crucial considerar la competencia por nutrientes, agua y luz solar entre los cultivos, porque al seleccionar combinaciones de cultivos que minimicen esta competencia y permitan una distribución más eficiente de los recursos disponibles, se puede mejorar la productividad del sistema en su conjunto (Brendel, 2021). Estrategias, como la selección cuidadosa de especies que tengan requerimientos nutricionales complementarios o que utilicen diferentes fuentes de agua, pueden ayudar a mitigar esta competencia y optimizar el rendimiento (Raza *et al.* 2021).

El cultivo intercalado de yuca, maní y maíz emerge como una opción eficiente entre los sistemas analizados. Este sistema se destaca por su equilibrio y eficiencia en los rendimientos relativos, lo que significa que cada cultivo contribuye significativamente al sistema, sin generar una competencia excesiva por los recursos disponibles (Zhang *et al.* 2022).

La combinación de yuca, maní y maíz presenta una sinergia única que maximiza la utilización del espacio y los recursos del suelo: la yuca, con su sistema radicular profundo y capacidad para mejorar la estructura del suelo, complementa las necesidades de nutrientes del maíz y el maní (Feng *et al.* 2021); el maní, con sus propiedades fijadoras de nitrógeno y su capacidad para mejorar la fertilidad del suelo beneficia, tanto a la yuca como al maíz (Li *et al.* 2024) y el maíz, aporta al sistema su capacidad para aprovechar eficientemente la luz solar y su alto potencial de rendimiento (Tang *et al.* 2020).

Los resultados indicaron que el cultivo intercalado de yuca, maní y maíz y el maní intercalado con maíz presentaron los mayores valores obtenidos en los índices de crecimiento. Respecto al uso equivalente de la tierra, se encontró que estos sistemas, a excepción del maní con maíz, exhibieron la mayor eficiencia biológica y competitiva, en comparación con los monocultivos. Finalmente, los cultivos intercalados de yuca, maní y maíz son una opción viable y prometedora para agricultores, que buscan optimizar el uso de la tierra, para lograr una producción agrícola sostenible y productiva.

Los cultivos intercalados, como los de maíz, maní y yuca, han mostrado mejores índices de crecimiento que los monocultivos. La TCA es mayor en sistemas intercalados, debido a una mejor utilización de la luz y los nutrientes, como evidencian Barrera-Violeth *et al.* (2017). Además, la TRC y la TAN son superiores en cultivos intercalados, ya que optimizan el uso de nitrógeno y mejoran la fotosíntesis, como se observó en lo informado por Sánchez Olaya *et al.* (2023). Estos resultados indican que los sistemas intercalados favorecen un crecimiento más eficiente y sostenible.

Otros autores, como Nwokoro *et al.* (2022) y He *et al.* (2023), discuten ampliamente respecto a cómo la competencia por recursos en sistemas intercalados puede afectar, de manera variada, el rendimiento de cultivos específicos, destacando que, en algunos

sistemas, la competencia intensa puede resultar en una disminución significativa de la productividad. En contraste, los resultados de este estudio muestran que el sistema intercalado de yuca, maíz y maní presenta una alta eficiencia en el uso de recursos, pero no se explora en profundidad cómo esta eficiencia se compara cuantitativamente con los índices de otros estudios, que utilizan sistemas y combinaciones similares.

Agradecimientos. Expresamos nuestro más sincero agradecimiento a la Universidad de la Amazonia, que nos proporcionó los recursos físicos necesarios para el desarrollo de esta investigación.

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. **Contribución de los autores:** Diana María Sánchez Olaya: conceptualización, metodología, análisis de datos, revisión, edición y supervisión; Daniela Fernanda Bautista Bohórquez y Karla Vanessa Cabrera Parra: escritura borrador original, metodología, revisión, edición y supervisión.

REFERENCIAS

- ABRELL, T.; NAUDIN, K.; BIANCHI, F.J.; ARAGÃO, D.V.; TITTONELL, P.; CORBEELS, M. 2022. Cassava root yield variability in shifting cultivation systems in the eastern Amazon region of Brazil. *Experimental Agriculture*. 58:e38. <https://doi.org/10.1017/s0014479722000333>
- ADJEI, E.O.; ESSEL, B.; BURI, M.M.; BINEY, N.; APPIAH, K. 2023. Soil quality and fertility dynamics under a continuous cassava-maize rotation in the semi-deciduous forest agro-ecological zone of Ghana. *Frontiers In Sustainable Food Systems*. 7:1095207. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1095207>
- ADU, M.O.; ASARE, P.A.; ASARE-BEDIAKO, E.; AMENORPE, G.; ACKAH, F.K.; AFUTU, E.; AMOAH, M.N.; YAWSON, D.O. 2018. Characterising shoot and root system trait variability and contribution to genotypic variability in juvenile cassava (*Manihot esculenta* Crantz) plants. *Heliyon* (Londres). 4(6):e00665. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e00665>
- AGUILAR, E. 2017. Manual del cultivo de yuca. Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria. San Jose, Costa Rica. 91p. Disponible desde Internet en: <https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/F01-10918.pdf>
- ALBINO-GARDUÑO, R.; TURRENT-FERNÁNDEZ, A.; CORTÉS-FLORES, J.; LIVERA-MUÑOZ, M.; MENDOZA-CASTILLO, M. 2015. Distribución de raíces y de radiación solar en el dosel de maíz y frijol intercalados. *Agrociencia*. 49(5):513-531.
- ALDANA GARCÍA, J.; CORREA MUNERA, M.A.; ÁLVAREZ DÁVILA, E. 2021. Árboles de la estación de monitoreo de

- biodiversidad en el Centro de Investigaciones Macagual (Florencia-Caquetá). Revista Brasileña de Investigación Animal y Ambiental (Brasil). 4(3):3575–3592. <https://doi.org/10.34188/bjaerv4n3-064>
- ALTIERI, M.A. 2010. Agroecología: principios y estrategias para diseñar sistemas agrícolas sostenibles. En: Sarandón, S. (ed.). Agroecología: el camino hacia una agricultura sustentable Ed. Ediciones Científicas Americanas. Argentina. p.27-34.
- ARENAS SALAZAR, A.P.; FERREGRINO PÉREZ, A.A.; SCHOOR, M.; GUTIÉRREZ ANTONIO, C.G. 2024. Sistemas de policultivos con especies endémicas: estrategia sostenible para mejorar el aporte nutricional a la dieta regional. Perspectivas de la Ciencia y la Tecnología. 140-169. <https://doi.org/10.61820/pct.vi.1083>
- ARIAS-COLLAGUAZO, W.M.; CASTRO-MORALES, L.G.; MALDONADO-GUDIÑO, C.W.; BURBANO-GARCÍA, L.H. 2021. Análisis del modelo de optimización aplicado a la producción agrícola en la Asociación del Gobierno Autónomo Parroquial de Cahuasqui. Dilemas contemporáneos: educación, política y valores (México). 8(3):46. <https://doi.org/10.46377/dilemas.v8i3.2670>
- BARRERA-VIOLETH, J.L.; CABRALES-HERRERA, E.M.; SÁENZ-NARVÁEZ, E.P. 2017. Respuesta del maíz híbrido 4028 a la aplicación de enmiendas orgánicas en un suelo de Córdoba-Colombia. Orinoquia. 21(2):38-45. <https://doi.org/10.22579/20112629.416>
- BIANUCCI, E.C.; FURLAN, A.L.; TORDABLE, M.D.; FABRA, A.I.; HERNÁNDEZ, L.; CARPENA RUIZ, R.; CASTRO, S. 2018. Impacto del cadmio sobre la acumulación y la producción de granos en cultivos de maní. En: Brutti, L.; Beltrán, M.; Salamone, I. (eds.). Biorremediación de los recursos naturales Ed. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Argentina. p.367-385.
- BITEW, Y.; DEREBE, B.; WORKU, A.; CHAKELIE, G. 2021. Response of maize and common bean to spatial and temporal differentiation in maize-common bean intercropping. Plos One. 16(10):e0257203. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0257203>
- BLANCO-VALDÉS, Y. 2019. Importancia de la calidad de la luz entre las plantas arvenses-cultivo. Cultivos tropicales. 40(4):e09.
- BOVER-FELICES, K.; SUÁREZ-HERNÁNDEZ, J. 2020. Contribución del enfoque de la agroecología en el funcionamiento y estructura de los agroecosistemas integrados. Pastos y Forrajes. 43(2):102-111.
- BRENDEL, O. 2021. The relationship between plant growth and water consumption: a history from the classical four elements to modern stable isotopes. Annals of Forest Science. 78:47 <https://doi.org/10.1007/s13595-021-01063-2>
- BRESTIČ, M.; YANG, X.; LI, X.; ALLAKHVERDIEV, S.I. 2021. Crop photosynthesis for the twenty-first century. Photosynthesis Research. 150:1-3. <https://doi.org/10.1007/s11120-021-00869-5>
- CABRERA MARULANDA, M.Á.; ROBLEDO BURITICÁ, J.; SOTO GIRALDO, A. 2018. Actividad insecticida del caldo sulfocálcico sobre *Hypothenemus hampei* (Coleoptera: Curculionidae). Boletín Científico. Centro de Museos. Museo de Historia Natural. 22(2):24-32 <https://doi.org/10.17151/bccm.2018.22.2.2>
- CANAVAR, Ö.; KAYNAK, M.A. 2008. Effect of different planting dates on yield and yield components of peanut (*Arachis hypogaea* L.). Turkish Journal of Agriculture and Forestry, 32(6):521-528.
- CASTILLO, M.J.; MOREJÓN, M.; SUÁREZ, G.M.; ACUÑA, I.R. 2022. Crop diversification in a cocoa agroforestry system in the Jamal massif, Baracoa municipality. Cuban Journal of Forest Sciences CFORE. 10(3):364-379.
- CENÓZ, P.J.; BURGOS, A.M.; BALBI, C.N. 2010. La densidad de plantas como variable de rendimiento cultural y económico de cuatro cultivos consociados bajo las condiciones agroecológicas del nordeste de Argentina (NEA). Revista Horticultura Argentina. 29(69):18-25.
- COLINA, A.M.; NAVA, J.C.; GUZMÁN, Z.F.; PORTILLO, E.; STHORMES, J.M.; FARÍA, A. 2020. Evaluación del comportamiento de los cultivos de yuca, maíz y topocho bajo distintas asociaciones. Revista de la Facultad de Agronomía de la Universidad del Zulia. 37(2):112-128.
- CRAINE, J.M.; DYBZINSKI, R. 2013. Mechanisms of plant competition for nutrients, water and light. Functional Ecology. 27(4):833-840. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12081>
- DE SANTIS, M.A.; CAMPANIELLO, D.; TOZZI, D.; GIUZIO, L.; CORBO, M.R.; BEVILACQUA, A.; SINIGAGLIA, M.; FLAGELLA, Z. 2023. Agronomic response to irrigation and biofertilizer of peanut (*Arachis hypogaea* L.) Grown under Mediterranean Environment. Agronomy. 13(6):1566. <https://doi.org/10.3390/agronomy13061566>
- DELAQUIS, E.; DE HAAN, S.; WYCKHUYS, K.A. 2018. On-farm diversity offsets environmental pressures in tropical agro-ecosystems: A synthetic review for cassava-based systems. Agriculture, Ecosystems & Environment. 251:226-235. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.09.037>
- DELGADO, R.; ESCALANTE, A.S.; MORALES, E.J.; LÓPEZ, J.A.; ROCANDIO, M. 2015. Producción y rentabilidad

- del frijol ejotero (*Phaseolus vulgaris* L.) asociado a maíz en función de la densidad y el nitrógeno en clima templado. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*. 47(2):15-25.
- DI BENEDETTO, A.; TOGNETTI, J. 2016. Técnicas de análisis de crecimiento de plantas: su aplicación a cultivos intensivos. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*. 42(3):258-282.
- DONG, Q.; ZHAO, X.; ZHOU, D.; LIU, Z.; SHI, X.; YUAN, Y.; JIA, P.; LIU, Y.; SONG, P.; WANG, X.; JIANG, C.; LIU, X.; ZHANG, H.; ZHONG, C.; GUO, F.; WAN, S.; YU, H.; ZHANG, Z. 2022. Maize and peanut intercropping improves the nitrogen accumulation and yield per plant of maize by promoting the secretion of flavonoids and abundance of *Bradyrhizobium* in rhizosphere. *Frontiers in Plant Science*. 13:957336. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.957336>
- EL-MEHY, A.A.; SHEHATA, M.A.; MOHAMED, A.S.; SALEH, S.A.; SULIMAN, A.A. 2023. Relay intercropping of maize with common dry beans to rationalize nitrogen fertilizer. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. 7:1052392. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1052392>
- FENG, C.; SUN, Z.; ZHANG, L.; FENG, L.; ZHENG, J.; BAI, W.; GU, C.; WANG, Q.; XU, Z.; VAN DER WERF, W. 2021. Maize/peanut intercropping increases land productivity: A meta-analysis. *Field Crops Research*. 270:108208. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108208>
- GARCÍA-RINCÓN, P.A.; NUÑEZ, J.M.; BAHAMÓN-MONJE, A.F. 2021. Características físicoquímicas y sensoriales de almendras fermentadas de cacao nacional (*Theobroma Cacao* L.) con adición de probióticos en el centro de investigaciones amazónicas, Cimaz Macagual (Caquetá, Colombia). *Ingeniería y Competitividad*. 23(2):e21210885. <https://doi.org/10.25100/iyec.v23i2.10885>
- GÓMEZ BETANCUR, L.M.; MÁRQUEZ GIRÓN, S.M.; RESTREPO BETANCUR, L.F. 2018. La milpa como alternativa de conversión agroecológica de sistemas agrícolas convencionales de frijol (*Phaseolus vulgaris*), en el municipio El Carmen de Viboral, Colombia. *IDESIA*. 36(1):123-131. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292018000100123>
- GÓMEZ-CAMPEROS, J.; JARAMILLO, H.; GUERRERO-GÓMEZ, G. 2021. Digital image processing techniques for detection of pests and diseases incrops: a review. *Ingeniería y Competitividad*. 24(1):e30110973. <https://doi.org/10.25100/iyec.24i1.10973>
- GONZÁLEZ, H.; FUENTES, N. 2017. Mecanismo de acción de cinco microorganismos promotores de crecimiento vegetal. *Revista de Ciencias Agrícolas*. 34(1):17-31. <http://dx.doi.org/10.22267/rcia.173401.60>
- GUAMÁN GUAMÁN, R.N.; DESIDERIO VERA, T.X.; VILLAVICENCIO ABRIL, Á.F.; ULLOA CORTÁZAR, S.M.; ROMERO SALGUERO, E.J. 2020. Evaluación del desarrollo y rendimiento del cultivo de maíz (*Zea mays* L.) utilizando cuatro híbridos. *Siembra*. 7(2):47-56. <https://doi.org/10.29166/siembra.v7i2.2196>
- HAN, F.; GUO, S.; NASEER, M.A.; GUO, R.; CAI, T.; ZHANG, P.; JIA, Z.; YANG, D.; CHEN, X.; REN, X. 2022. Potential use of maize-peanut intercropping to adapt to drought and nitrogen-shortage impacts. *Plant and Soil*. 499:255-274. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05526-x>
- HE, C.; ZHOU, B.; WANG, H.; WEI, Y.; HUANG, J. 2023. A first-year maize/cassava relay intercropping system improves soil nutrients and changes the soil microbial community in the symbiotic period. *Frontiers in Microbiology*. 14:1087202. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1087202>
- HOWELER, R.H. 2014. Sustainable soil and crop management of cassava in Asia: a reference manual. Ed. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). Colombia. 280p.
- HUSS, C.P.; HOLMES, K.D.; BLUBAUGH, C.K. 2022. Benefits and risks of intercropping for crop resilience and pest management. *Journal of Economic Entomology*. 115(5):1350-1362. <https://doi.org/10.1093/jee/toac045>
- HUSSAIN, M.; UL-ALLAH, S.; FAROOQ, S. 2023. Integrated crop management in sustainable agriculture. *Agriculture*. 13(5):954. <https://doi.org/10.3390/agriculture13050954>
- KIROUANI, A.; BOUKHALFOUN, L.; OULDKIAR, R.; BOUZERZOUR, H. 2023. Analysis of the effect of GE interaction on the grain yield and its related traits in rain-fed Algerian durum wheat (*Triticum turgidum* L. var. durum) grown in contrasting environments. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*. 76(2):10297-10308. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v76n2.102517>
- LEÓN, S.T. 2010. Agroecología: desafíos de una ciencia ambiental en construcción. En: León, T.; Altieri, M. A. (eds.). *Vertientes del pensamiento agroecológico: fundamentos y aplicaciones*. Ed. Sociedad Científica Latinoamericana de Agroecología. Universidad Nacional de Colombia. Colombia. p.53-77.
- LI, G.; GUO, X.; SUN, W.; HOU, L.; WANG, G.; TIAN, R.; WANG, X.; QU, C.; ZHAO, C. 2024. Nitrogen application in pod zone improves yield and quality of two peanut cultivars by modulating nitrogen accumulation and metabolism. *BMC Plant Biology*. 24(1):48. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-04725-1>
- LI, L.; DUAN, R.; LI, R.; ZOU, Y.; LIU, J.; CHEN, F.; XING, G. 2022. Impacts of corn intercropping with soybean, peanut and millet through different planting patterns on population

- dynamics and community diversity of insects under fertilizer reduction. *Frontiers in Plant Science*. 13:936039. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.936039>
- LIU, Y.; YAN, Z.; WANG, J.; ZHAO, J.; LIU, Y.; ZOU, J.; LI, L.; ZHANG, J.; WAN, S. 2020. Optimizing initial nitrogen application rates to improve peanut (*Arachis hypogaea* L.) biological nitrogen fixation. *Agronomy*. 13(12):3020. <https://doi.org/10.3390/agronomy13123020>
- LV, Z.; ZHOU, D.; SHI, X.; REN, J.; ZHANG, H.; ZHONG, C.; KANG, S.; ZHAO, X.; YU, H.; WANG, C.T. 2023. The determination of peanut (*Arachis hypogaea* L.) pod-sizes during the rapid-growth stage by phytohormones. *BMC Plant Biology*. 23(1):371. <https://doi.org/10.1186/s12870-023-04382-w>
- MARTIN, T.N.; FIPKE, G.M.; MINUSSI WINCK, J.E.; MARCHESE, J.A. 2020. ImageJ software as an alternative method for estimating leaf area in oats. *Acta Agronómica*. 69(3):162-169. <https://doi.org/10.15446/acag.v69n3.69401>
- MARTÍNEZ DÍAZ, G. 2019. Efecto de la maleza como cobertera en la fertilidad del suelo y rendimiento de nogal pecanero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 10(1):123-130. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i1.1729>
- MBANJO, E.G.N.; RABBI, I.; FERGUSON, M.; KAYONDO, S.I.; ENG, N.H.; TRIPATHI, L.; KULAKOW, P.; EGESI, C. 2021. Technological innovations for improving cassava production in Sub-Saharan Africa. *Frontiers in Genetics*. 11:623736. <https://doi.org/10.3389/fgene.2020.623736>
- MONTERO, J. 2020. Importancia nutricional y económica del maní (*Arachis hypogaea* L.). *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales (Bolivia)* 7(2):112-125.
- NEGASH, F.; MULUALEM, T. 2014. Enhanced land use system through cassava/maize intercropping in south region of Ethiopia. *Sky Journal of Agricultural Research*. 3(10):196-200.
- NICHOLLS, C.I.; ALTIERI, M.A. 2018. Caminos para la ampliación de la agroecología. *Boletín Científico 1. CELIA Ediciones*. Colombia. 34p.
- NORIEGA-NAVARRETE, J.L.; MORENO-SALAZAR, R.S.; LÓPEZ-CRUZ, I.L. 2021. Revisión: modelos de crecimiento y rendimiento de maíz en escenarios de cambio climático. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 12(1):127-140. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i1.2552>
- NWOKORO, C.C.; KREYE, C.; NECPALOVA, M.; OLUJIDE, A.; BARTHEL, M.; PYPERS, P.; HAUSER, S.; SIX, J. 2022. Cassava-maize intercropping systems in southern Nigeria: Radiation use efficiency, soil moisture dynamics, and yields of component crops. *Field Crops Research*. 283:108550. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108550>
- ONASANYA, O.O.; HAUSER, S.; NECPALOVA, M.; SALAKO, F.K.; KREYE, C.; TARIKU, M.; SIX, J.; PYPERS, P. 2021. On-farm assessment of cassava root yield response to tillage, plant density, weed control and fertilizer application in southwestern Nigeria. *Field Crops Research*. 262:108038. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.108038>
- ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA, FAO. 2021. Transformar los sistemas alimentarios y agrícolas: un reto que debemos afrontar juntos. Disponible desde Internet en: <https://www.fao.org/fao-stories/article/es/c/1254793/>
- PALACIOS, V.J.; MAVISOY, K.H. 2020. La agroforestería frente a la agenda 2030 para el desarrollo sostenible. Ed. Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A. 73p.
- PEDELINI, R. 2008. Maní: guía práctica para su cultivo. *Boletín de Divulgación Técnica N°2*. Ediciones Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Argentina. 21p.
- PEREYRA, T.; OHANIAN, A.E.; SALUSSO, N. 2019. Eficiencia en el uso de radiación y agua, en alfalfa (*Medicago sativa* L.) intercalada con pasto de Sudán (*Sorghum sudanense*) y mijo perla (*Pennisetum americanum*). *Archivos Latinoamericanos de Producción Animal*. 27(1-4):13-19.
- RAMOS TORRES, D.I. 2021. Contribución de la educación superior a los Objetivos de Desarrollo Sostenible desde la docencia. *Revista Española de Educación Comparada*. 37:89-110. <http://dx.doi.org/10.5944/reec.37.2021.27763>
- RAZA, M.A.; GUL, H.; WANG, J.; YASIN, H.S.; QIN, R.; KHALID, M.H.B.; NAEEM, M.; YANG, L.; IQBAL, N.; GITARI, H.; AHMAD, S.; BATTAGLIA, M.; ANSAR, F.; YANG, F.; YANG, W. 2021. Land productivity and water use efficiency of maize-soybean strip intercropping systems in semi-arid areas: A case study in Punjab Province, Pakistan. *Journal of Cleaner Production*. 308:127282. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127282>
- REYES-PALOMINO, S.E.; CANO CCOA, D.M. 2022. Efectos de la agricultura intensiva y el cambio climático sobre la biodiversidad. *Revista de Investigaciones Altoandinas*. 24(1):53-64. <https://doi.org/10.18271/ria.2022.328>
- RODRIGO-CANO, D.; PICÓ, M.J.; DIMURO, G. 2019. Los Objetivos de Desarrollo Sostenible como marco para la acción y la intervención social y ambiental. *Retos: Revista de Ciencias de la Administración y Economía*. 8(2):1-16. <https://doi.org/10.17163/ret.n17.2019.02>
- RUIZ, D.M.; MARTINEZ, J.P.; FIGUEROA, A. 2015. Agricultura sostenible en ecosistemas de alta montaña. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*. 13(1):129-138.

- RUIZ-GONZÁLEZ, R.O.; VICTORINO-RAMÍREZ, L. 2015. Respuesta del policultivo Jamaica-Frijol-Maíz a tratamientos de fertilización en Villa Flores, Chiapas, México. *Agrociencia*. 49(5):545-557.
- SADRAS, V.O.; VILLALOBOS, F.J.; FERERES, E. 2016. Crop development and growth. En: Villalobos, F.; Fereres, E. (eds). *Principles of agronomy for sustainable agriculture*. Ed. Springer. p.141-158. https://doi.org/10.1007/978-3-319-46116-8_11
- SAMIDJO, G.; SARJIYAH. 2020. Effect of planting and harvesting time on cassava (*Manihot esculenta* Crantz) Var. Gambyong. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 458:012036. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/458/1/012036>
- SÁNCHEZ OLAYA, D.M.; ROMERO OSPINA, M.F.; SANDOVAL RODRÍGUEZ, W.; RIVERA RAMÍREZ, K.T.; SUAZA GARCÍA, E.L. 2023. Evaluation of the growth of maize in monoculture and when associated with peanuts and cassava in the Colombian. *Agronomía Colombiana*. 41(2):1-9. <https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v41n2.107281>
- SÁNCHEZ TORRES, J.D.; LIGARRETO MORENO, G.A.; LEIVA BARÓN, F.R. 2020. Variabilidad del crecimiento y rendimiento del cultivo de maíz para choclo (*Zea mays* L.) como respuesta a diferencias en las propiedades químicas del suelo en la Sabana de Bogotá, Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*. 65(2):6579-6583.
- SANTOS, J.A.; NARVÁEZ, L.; SALCEDO, S.M.; ACEVEDO, A.N.; MERCADO, L.C.; SALCEDO, J.G. 2019. Fisiología del cultivo de yuca en el bosque seco tropical de Sucre-Colombia. *Temas Agrarios*. 24(1):17-26. <https://doi.org/10.21897/rta.v24i1.1774>
- SHAH, K.K.; MODI, B.; PANDEY, H.P.; SUBEDI, A.; ARYAL, G.; PANDEY, M.; SHRESTHA, J. 2021. Diversified crop rotation: An approach for sustainable agriculture production. *Advances in Agriculture*. 1-9. <https://doi.org/10.1155/2021/8924087>
- SHIFERAW, B.; PRASANNA, B.M.; HELLIN, J.; BÄNZIGER, M. 2011. Crops that feed the world 6. Past successes and future challenges to the role played by maize in global food security. *Food Security*. 3:307-327. <https://doi.org/10.1007/s12571-011-0140-5>
- ŠIKULJAK, D.; MAROTTI, I.; BOSI, S.; ANĐELKOVIĆ, A.A.; BOŽIĆ, D.; VRBNICANIN, S.; TANVEER, A.; DINELLI, G. 2023. Effects of crop management systems on weed abundance and soil seed bank. *Journal of Crop Health*. 75:2355-2367. <https://doi.org/10.1007/s10343-023-00903-7>
- SOLANO, V. 2021. El maíz: semilla, cultivo, alimento, vida en las tradiciones indígenas mesoamericanas y chibchenses de Costa Rica. Ed. Centro de Investigaciones en Identidad y Cultura Latinoamericanas, Universidad de Costa Rica. Costa Rica. 100p.
- SUÁREZ-LONDOÑO, A.S.; JIMÉNEZ-LÓPEZ, A.F.; CASTRO-FRANCO, M.; CRUZ-ROA, A.A. 2017. Clasificación y mapeo automático de coberturas del suelo en imágenes satelitales utilizando Redes Neuronales Convolucionales. *Orinoquia*. 21(1):64-75. <https://doi.org/10.22579/20112629.432>
- TAMAYO ORTIZ, C.V.; ALEGRE ORIHUELA, J.C. 2022. Asociación de cultivos, alternativa para el desarrollo de una agricultura sustentable. *Siembra*. 9(1):e3287. <https://doi.org/10.29166/siembra.v9i1.3287>
- TANG, X.; ZHONG, R.; JIANG, J.; HE, L.; HUANG, Z.; SHI, G.; WU, H.; LIU, J.; XIONG, F.; ZHAO, H.; TANG, R.; HE, L. 2020. Cassava/peanut intercropping improves soil quality via rhizospheric microbes increased available nitrogen contents. *BMC Biotechnology*. 20:13. <https://doi.org/10.1186/s12896-020-00606-1>
- TAPIA-HERNÁNDEZ, A.; ALDASORO-MAYA, M.E.; RODRIGUEZ-ROBLES, U.; MARTÍNEZ-ZURIMENDI, P.; ROSSET, P. 2024. Milpa intercalada con árboles frutales: revisión y estudio de caso en el Cañón del Usumacinta, Tabasco, México. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*. 21(2):168-185. <https://doi.org/10.22231/asyd.v21i2.1580>
- VARÓN DE AGUDELO, F.; RODRÍGUEZ, J.; VILLALOBOS, J.C.; PARODY, J. 2022. Manual de enfermedades y plagas del maíz. *Advanta*. 72p. Disponible desde Internet en: <https://cgspace.cgiar.org/server/api/core/bitstreams/fdb73c97-4dd3-41a2-8aee-1b6c9c724f30/content>
- VÉLEZ-VARGAS, L.D.; CLAVIJO-PORRAS, J.; LIGARRETO-MORENO, G.A. 2007. Análisis ecofisiológico del cultivo asociado maíz (*Zea mays* L.) -fríjol voluble (*Phaseolus vulgaris* L.). *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín (Colombia)*. 60(2):3965-3984.
- XIA, H.; WANG, L.; XUE, Y.; KONG, W.; XUE, Y.; YU, R.; XU, H.; WANG, X.; WANG, J.; LIU, Z.; GUO, X. 2019. Impact of increasing maize densities on agronomic performances and the community stability of productivity of maize/peanut intercropping systems. *Agronomy*. 9(3):150. <https://doi.org/10.3390/agronomy9030150>
- ZHANG, D.; SUN, Z.; LIU, F.; BAI, W.; YANG, N.; ZHANG, Z.; DU, G.; CHEN, F.; CAI, Q.; WANG, Q.; ZHANG, Y.; WANG, R.; ARSHAD, A.; HAO, X.; SUN, M.; GAO, Z.; ZHANG, L. 2020. Maize plant density affects yield,

- growth and source-sink relationship of crops in maize/peanut intercropping. *Field Crops Research*. 257:107926. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107926>
- ZHANG, L.; YUAN, J.; ZHANG, M.; ZHANG, Y.; WANG, L.; LI, J. 2022. Long term effects of crop rotation and fertilization on crop yield stability in southeast China. *Scientific Reports*. 12:14234. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-17675-1>
- ZHANG, W.; SURIGAOGE, S.; YANG, H.; YU, R.; WU, J.; XING, Y.; CHEN, Y.; LI, L. 2024. Diversified cropping systems with complementary root growth strategies improve crop adaptation to and remediation of hostile soils. *Plant and Soil*. 502:7-30. <https://doi.org/10.1007/s11104-023-06464-y>



Evaluación de indicadores de sostenibilidad del suelo y de salud del cultivo en sistemas convencionales y orgánicos de yuca

Evaluation of soil sustainability and crop health indicators in conventional and organic cassava systems

Luis Felipe De-La-Ossa-Puello¹ ; José Luis Barrera-Violeth^{1*} ; Enrique Miguel Combatt-Caballero²

¹Universidad de Córdoba, Grupo de Investigación Agricultura sostenible. Montería - Córdoba, Colombia; e-mail: fdelaossa@correo.unicordoba.edu.co; jlbarrera@correo.unicordoba.edu.co

²Universidad de Córdoba, Grupo de Investigación cultivos tropicales de clima cálido. Montería - Córdoba, Colombia; e-mail: emcombatt@correo.unicordoba.edu.co.

*autor de correspondencia: jlbarrera@correo.unicordoba.edu.co

Cómo citar: De-La-Ossa-Puello, L.F.; Barrera-Violeth, J.L.; Combatt-Caballero, E.M. 2024. Evaluación de indicadores de sostenibilidad del suelo y de salud del cultivo en sistemas convencionales y orgánicos de yuca. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 27(2):e2402. <http://doi.org/10.31910/rudca.v27.n2.2024.2402>

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 27 de 2023

Aceptado: octubre 22 de 2024

Editado por: Helber Adrián Arévalo Maldonado

RESUMEN

El cultivo de yuca (*Manihot esculenta* Crantz) en Colombia, se realiza empleado sistemas de siembra, como el monocultivo, con prácticas que vulneran la sostenibilidad del agroecosistema, por degradación de los suelos, erosión y extracción de nutrientes y, entre éstas, el uso de maquinarias y la aplicación de fertilizantes inorgánicos. Debido a esta situación, se ha generado un interés por el implemento de técnicas de manejo orgánico, enfoque que ha demostrado producir beneficios al sistema suelo-planta. En esta investigación se evaluaron los niveles de sostenibilidad en sistemas de cultivo de yuca, del municipio de Ciénaga de Oro-Córdoba, Colombia. Para ello fueron definidos tres sistemas de cultivo de manejo orgánico y tres con sistemas convencionales. Cada 30 días, durante periodo de 18 meses, se analizaron 10 indicadores de calidad de suelos y 10 de salud de cultivos, con base en la metodología de diagnóstico rápido de la sostenibilidad de los cultivos. Los sistemas orgánicos obtuvieron mejores resultados para las variables de calidad de suelo, con promedios que oscilaron entre 7,00 y 9,00; igualmente, para salud de cultivo, con promedios entre 5,00 y 10,00 y respecto a los sistemas convencionales, con valores entre 2,00 y 8,00, en proporción para los indicadores de calidad de suelo y salud de cultivo. La implementación de prácticas agrícolas con manejo orgánico se convierte en una alternativa importante para mejorar la productividad en los sistemas agronómicos de la región.

Palabras clave: Agricultura convencional; Agricultura orgánica; Agroecosistemas; Diagnóstico rápido; Raíces tuberosas.

ABSTRACT

The cassava (*Manihot esculenta* Crantz) crop in Colombia is carried out using planting systems such as monoculture, with practices that impact the sustainability of the agroecosystem due to soil degradation, erosion, and nutrient extraction, including the use of machinery and the application of inorganic fertilizers. Due to this situation, interest has been generated in implementing organic management techniques, an approach that has been shown to benefit the soil-plant system. This research evaluated the levels of sustainability in cassava crop systems in the municipality of Ciénaga de Oro-Córdoba, Colombia. For this purpose, three organic farming systems and three conventional systems were defined. Every 30 days during a period of 18 months 10 soil quality indicators and 10 crop health indicators were analyzed based on the rapid diagnosis methodology of crop sustainability. Organic systems obtained better results for soil quality variables, with averages ranging between 7.00 and 9.00, as well as for crop health, with averages between 5.00 and 10.00 compared to conventional systems, with values between 2.00 and 8.00 in proportion to soil quality and crop health indicators. The implementation of organic farming practices becomes an important alternative to improve productivity in the region's agronomic systems.

Keywords: Agroecosystems; Conventional agriculture; Organic agriculture; Rapid diagnosis; Tuberous roots.

INTRODUCCIÓN

La yuca *Manihot esculenta* Crantz es uno cultivo importante en las regiones tropicales, a nivel mundial, debido a que representa el cuarto producto básico más relevante después del arroz, el trigo y el maíz, respecto a la cantidad de calorías y proteínas obtenidas por hectárea (Zhang *et al.* 2023). Actualmente, se cultiva en zonas con altitud, hasta los 2.000 m s.n.m., con temperaturas entre 25 y 29 °C, precipitaciones en un rango de 750 a 2.000 mm anuales y fotoperiodo de 10 a 12 horas (Jácome Gómez & Carrillo Cruz, 2020).

Para el 2020 se reportaron cerca de 28.243.258 millones de hectáreas establecidas, con una producción global de 315 millones de toneladas métricas, en 2021 y un rendimiento promedio de 10,7 toneladas por hectárea (FAO, 2020).

En Colombia, la falta de diversificación de prácticas agrícolas en el cultivo de la yuca se evidencia en la persistencia en el uso de técnicas convencionales, como labranza mecanizada tradicional y el uso de agroquímicos, actividades agrícolas que promueven el deterioro de los componentes ambientales y fisicoquímicos del suelo (Anwar *et al.* 2023). Estas prácticas, que generan la reducción de la productividad, por lo cual, es necesario buscar alternativas que minimicen el acelerado proceso de contaminación del suelo y del agua subterránea y se despierte el interés por el uso racional de los agroquímicos y la implementación de un complemento nutricional con “fertilización ecológica” (Sepúlveda-Vargas, 2020), basada en el uso de fertilizantes orgánicos.

Los sistemas de manejo orgánico se caracterizan por presentar biodiversidad vegetal y animal adecuada, que cumplen funciones biológicas, que contribuyen a mantener el equilibrio dinámico en un estado favorable, contexto que se relaciona con el implemento de prácticas agrícolas, como rotaciones de cultivos, policultivos, aplicación de fertilizantes orgánicos, entre otros procesos que, en conjunto, fomentan la sostenibilidad del sistema, ya que facilitan la restauración progresiva de los suelos, principalmente, los que están bajo explotación agropecuaria permanente. Por consiguiente, pueden influir directamente sobre la productividad del cultivo (Porta *et al.* 2019; Fonseca-Carreño & Narváez-Benavidez, 2020).

En los últimos años, trabajos realizados en el departamento de Córdoba, Colombia, demuestran los efectos benéficos del uso de técnicas de manejo orgánico, en los niveles de sostenibilidad de sistemas de cultivo tradicionales, como banano, maíz, arroz y ñame (Caicedo-Camposano *et al.* 2020), situación que, de acuerdo con Anwar *et al.* (2023), no es ajena al cultivo de yuca.

Los indicadores de sostenibilidad se definen como un conjunto de herramientas específicas que se pueden utilizar para determinar el comportamiento espaciotemporal del sistema de cultivo, mediante el análisis del nivel ambiental, socioeconómico y cultural; además, se pueden medir aplicando análisis cuantitativos o cualitativos, dependiendo de la metodología y atributos planteados (Cuenca *et al.* 2021).

En la actualidad, existe una serie de metodologías basadas en indicadores de sostenibilidad para determinar puntos críticos, como aplicación excesiva de agroquímicos, bajo nivel de biodiversidad, procesos erosivos intensos, alto nivel de compactación, incidencia evidente de plagas y enfermedades, baja productividad anual, variables que condicionan la estabilidad en diferentes sistemas de cultivos y permiten establecer estrategias de recuperación, a mediano plazo (Savels *et al.* 2024).

Algunas de estas metodologías son: el Marco para la evaluación de sistemas de manejo de recursos naturales incorporando indicadores de sustentabilidad (MESMIS), propuesta por Masera *et al.* (1999); la evaluación de agroecosistemas, mediante indicadores de sustentabilidad (EAMIS), descrita por Sarandón & flores (2009), ambas con énfasis en la evaluación integral de agroecosistemas, mediante el análisis de los niveles económico, social y ecológico; la establecida por Marull (2005), que se basa en la aplicación de métodos de parametrización socioambientales, que permiten analizar la vulnerabilidad del agroecosistema, a escala espaciotemporal, de manera global y la planteada por Altieri & Nicholls (2002), que presenta una inclinación hacia el estudio de la dimensión ambiental con mayor relevancia en los aspectos concernientes a la producción agrícola, como la calidad del suelo y la salud de cultivo.

Considerando lo anterior, la presente investigación tuvo como objetivo evaluar los indicadores calidad de suelo y de salud de los cultivos que determinan la sostenibilidad de sistemas de cultivo de yuca, manejados de forma convencional y orgánica, en el municipio de Ciénaga de Oro, departamento de Córdoba, Colombia.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción de la zona de estudio. La investigación se realizó en el municipio de Ciénaga de Oro, departamento de Córdoba, Colombia. Esta área, pertenece a la subregión del Medio Sinú, se encuentra a 13 m s.n.m.; según la clasificación de Holdridge (2000) **corresponde a la zona de vida de bosque seco tropical**, con temperatura máxima de 33,58 °C, mínima de 24,25 °C y promedio de 28,92 °C, humedad relativa de 83 % y precipitación anual de 1.500 mm.

Los seis lotes productores de yuca seleccionados están ubicados en el centro poblado San Antonio del Táchira (8°48'21" N y 75°33'37" W), Canta Gallo (8°50'03" N y 75°32'46" W), Mayoría (8°50'22" N y 75°34'28" W) y el centro poblado Las Palmitas (8°48'41" N y 75°37'12" W), La Gloria (8°50'48" N y 78°49'36" W), Torrente 8°50'30" N 76°39'13" W y El Llano (8°47'35" N y 75°35'04" W).

Los suelos característicos del área de estudio corresponden a tipo Fluventic Haplustepts (Inceptisol) (Soil Survey Staff, 2022), de texturas medias a finas (franco arcilloso a franco arcilloso limoso), con régimen de humedad údico-acuico y régimen de temperatura isohipertérmico. La morfología del perfil muestra un Ap. horizonte sobre un Bw, siendo el primero de color pardo grisáceo muy oscuro, con estructura de bloques angulares, moderadamente desarrollados. El segundo horizonte es de color pardo amarillento.

Recolección de datos y análisis. En esta investigación se utilizó la metodología denominada “sistema agroecológico rápido de evaluación de calidad de suelos y salud de cultivos”, formulada por Altieri & Nicholls (2002), para cultivos del café, ajustada para el sistema de cultivo de yuca, ya que esta metodología permite comprobar el nivel de sostenibilidad actual de sistemas de cultivo, mediante la determinación de 10 indicadores para suelo y 10 indicadores para el cultivo, que se evalúan a través de atributos específicos, que se les asignan valores de 1, 5 o 10, dependiendo de la valoración visual; por último, a partir de los datos obtenidos de la medición u observación, se calcula el índice general de sostenibilidad ecológica.

Para obtener información se realizaron encuestas directamente con los dirigentes de los lotes y se obtuvo la respuesta de 40 unidades de producción. A partir de la información obtenida fueron seleccionados los lotes Carreto, Las Brisas y Calichetres, con fundamentos orgánicos y los lotes La Lucha, Lote Siete y Caribe, cultivados bajo un sistema convencional.

La selección de los seis lotes evaluados se basó en la determinación de características, como en el uso de productos químicos, durante un período de cinco años y la implementación de estrategias que promovieran la conservación de los recursos locales, confirmando que, en los sistemas con manejo de cultivo orgánico, el control de plagas y de enfermedades fue realizado mediante la aplicación de sustancias naturales; en cambio, en los demás sistemas definidos inicialmente como orgánicos, se aplicó herbicidas e insecticidas, en cosechas realizadas en los últimos años.

Además, en estos lotes se evidenció la realización de labores agrícolas, como preparación del terreno y cosecha de manera manual, incorporación de arvenses y de residuos de cosecha al suelo, uso de abonos caseros, rotación de cultivos, asociación con especies, como maíz y ñame, siembra de especies naturales circundantes, como roble, cedro, caracolí y vara de humo.

Por otra parte, en los lotes con manejo de cultivo convencional se caracterizaron, en general, por efectuar prácticas, como monocultivo, producción con fines industriales, preparación del terreno mecanizada, tratamiento de la semilla con agroquímicos, control químico de arvenses con preemergentes, herbicidas e insecticidas dirigidos, uso de fertilizantes minerales, entre los que cabe mencionar urea, KCl y NPK (15-15-15), recolección y quema arvenses y residuos de cosecha.

Medición y monitoreo de indicadores. Para realizar la valoración y la asignación de los valores respectivos para los indicadores de calidad del suelo y salud de cultivos, se realizaron nueve monitoreos, durante un periodo de 16 meses, cada 30 días, que correspondieron a la época seca (enero-marzo) y lluviosa (mayo-octubre), teniendo en cuenta el ciclo biológico de los cultivos (15 meses) y la frecuencia del mantenimiento, como son limpias y escardas, aporcado, riego, abonado y control de arvenses.

Los datos de percepción se obtuvieron mediante una encuesta, que abarcó el total de indicadores evaluados (10 de calidad de suelos y 10 de salud de cultivos), atributos y valor asignado; por último, los resultados fueron clasificados en niveles, como atributo deseable (10), atributo medio (5) y atributo indeseable (1).

Muestreo y análisis de suelos. El muestreo se realizó a principios de época seca, correspondiente a enero y en época de lluvia, para julio. Las muestras recolectadas en cada uno de los lotes fueron llevadas al laboratorio de Suelos y Aguas de la Universidad de Córdoba.

Para realizar el análisis fisicoquímico de las muestras se emplearon los métodos analíticos, estandarizados por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, 2006). Se determinaron los parámetros: pH, por potenciométrica (relación suelo: agua 1:1); materia orgánica M.O. (%), por el método de Walkley-Black; S (mg Kg^{-1}), por el método de monofosfato de calcio; P (mg Kg^{-1}), mediante Bray II; Ca, Mg, K y Na (cmolc Kg^{-1}), por el método de acetato de amonio 1N a pH 7,0; Al+H (cmolc Kg^{-1}), por KCl 1 N; la CICE, por sumatoria de cationes y textura, con el hidrómetro de Bouyoucos.

Prueba de respiración. Para determinar la tasa de respiración en el suelo se utilizó método descrito por Alef & Nannipieri (1995). Se hicieron lecturas en cada lote, distribuyendo las muestras en el campo en 3 puntos, seleccionados al azar y 3 consistieron como testigos, con un total de 21 muestras, cada una, con 30 ml de 0,2 N de NaOH. Cada muestra se dejó incubar durante 24 horas, se adicionaron 2 ml de BaCl_2 y se tituló con HCl 0,2 N, usando fenolfaleína, como indicador.

Análisis estadístico. Con los datos obtenidos se realizó un análisis de varianza (ANAVA ($P < 0,05$), para aplicar la prueba de correlación de Pearson. Los análisis se realizaron en el software SAS (SAS, 2012) y las gráficas tipo amebas y de columnas, entre las unidades examinadas vs promedio de indicadores, se realizaron en R v. 2021.09.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de indicadores. Los resultados obtenidos de la prueba de correlación de Pearson respecto a la evaluación de la sostenibilidad de los sistemas de cultivo de yuca orgánico y convencional se observan en la tabla 1, para calidad de suelos y salud de cultivos.

El análisis de correlación muestra que el indicador contenido de materia orgánica presentó asociación significativa ($p \leq 0,05$), con los indicadores signos de actividad biológica del 96 %, control de la erosión del suelo 95 %, retención de humedad 90 %, cobertura de suelo 87 % (Tabla 1). De acuerdo con Altieri & Nicholls (2012), existe una relación directa entre la adición de materia orgánica, tasa de respiración y propiedades físicas del suelo, debido a que la velocidad de descomposición de la materia orgánica aumenta y, en la misma proporción, la formación de agregados minerales, contexto que favorecen la estabilidad del suelo, evitando que los efectos directos propios de la erosión hídrica y degradación química.

Tabla 1. Prueba de correlaciones de Pearson para los indicadores de salud de cultivos y los indicadores de calidad de suelos, de las seis unidades de producción de yuca.

Correlaciones de Pearson de los indicadores de salud de los cultivos									
Variable	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10
V1	0,92***	0,93***	0,90**	ns	0,95***	0,75*	ns	0,83**	ns
V2		0,98***	0,91**	ns	0,89**	0,92**	ns	0,94***	ns
V3			0,94***	0,73*	0,95***	0,90**	ns	0,94***	ns
V4				ns	0,86**	0,75*	ns	0,79*	ns
V5					ns	0,80*	ns	0,74*	ns
V6						0,81*	ns	0,89**	ns
V7							0,79*	0,98***	ns
V8								0,78*	ns
V9									ns
Indicadores de salud de cultivos									
V1	Control de arvenses					V2	Diversidad genética		
V3	Diversidad de cultivos					V4	Rendimiento actual o potencial		
V5	Crecimiento del cultivo					V6	Aspecto del cultivo		
V7	Control de plagas					V8	Resistencia a enfermedades		
V9	Resistencia o tolerancia a estrés					V10	Diversidad natural circundante		
Correlaciones de Pearson de los indicadores de calidad de suelos									
Variable	V12	V13	V14	V15	V16	V17	V18	V19	V20
V11	0,96***	ns	0,80*	ns	0,80*	0,79*	0,95***	0,90**	0,87**
V12		0,81**	0,93***	ns	0,87**	0,86**	0,93***	0,86**	0,87**
V13			0,91**	0,95***	ns	0,73*	0,75*	ns	0,75*
V14				0,88**	0,84**	0,87**	0,78*	ns	0,75*
V15					ns	0,77*	ns	ns	ns
V16						ns	0,75*	0,89**	0,87**
V17							0,80*	ns	ns
V18								0,81**	0,93***
V19									0,84**
Indicadores de calidad de suelos									
V11	Contenido de materia orgánica color y olor					V12		signos de actividad biológica	
V13	Nivel de desarrollo radicular					V14		Estado de residuos	
V15	Compactación e infiltración					V16		Estructura	
V17	Profundidad del suelo					V18		Control de la erosión del suelo	
V19	Retención de humedad					V20		Cobertura de suelo	

* Diferencias estadísticas al 10 %, ** Diferencias estadísticas al 5 %, *** Diferencias estadísticas al 1 %, ns: no hay diferencias estadísticas.

En el aspecto salud del cultivo, el indicador diversidad genética mostró asociación significativa con los indicadores diversidad de cultivos del 98 % y resistencia o tolerancia a estrés 94%, control de arvenses 92 %, control de plagas 92 % y rendimiento del cultivo 91 %.

Esto estuvo ligado, al hecho de que los agroecosistemas, sobre todo con cultivos orgánicos, presentan condiciones cercanas al ecosistema circundante, con policultivos, lo cual, según López-López *et al.* (2018), se debe a que el sistema de cultivo está asociado con especies silvestres adaptadas y tolerantes a las al ataque de plagas que, además, influyen directamente en el incremento de residuos orgánicos, aumentando la actividad biológica del suelo.

Valoración de indicadores. Los promedios arrojados por el análisis visual de los indicadores estudiados para calidad de suelos y salud de cultivos para el final del proyecto se señalan, respectivamente, en las figuras 1 y 2.

En cuanto a los indicadores de calidad de suelos se encontró que los sistemas con fundamento orgánico presentaron promedios que oscilaron entre 7,00 y 9,00, valoración que fue considerada como deseable, mientras que los sistemas convencionales mostraron valores entre 2,00 y 8,00, obteniendo los promedios más bajos en los indicadores de contenido de materia orgánica, retención de humedad, cobertura de suelo y signos de actividad biológica (Figura 1).

Este resultado se ajusta a lo reportando por Cuenca *et al.* (2021), quienes indicaron que las parcelas con maní y maíz, ubicadas en la Parroquia Casanga del cantón Paltas, Ecuador, cultivadas con sistemas de manejo orgánico, presentaron mejor calidad de suelos, con promedio general entre el 63 y 80 %, en comparación con las parcelas con sistema convencional, las cuales, obtuvieron promedio general entre 54 y 58 %.

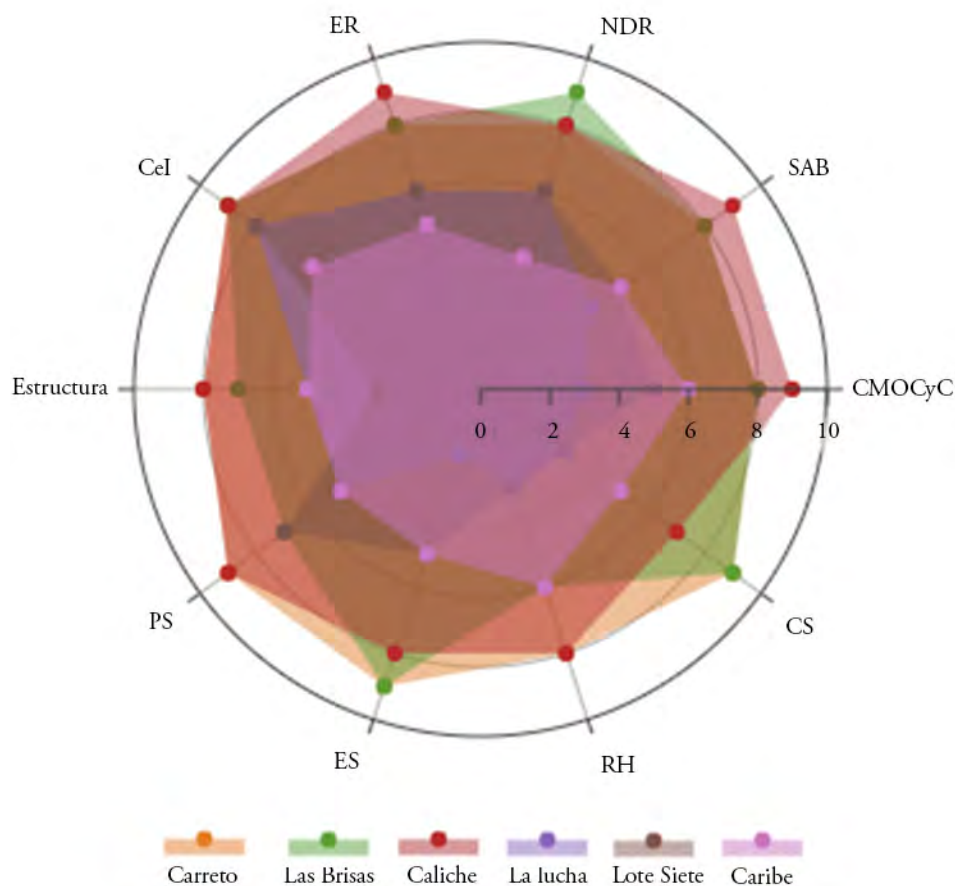


Figura 1. Diagrama de valores de indicadores de calidad del suelo. Carreto, Las Brisas y Caliche lotes con sistema de cultivo de yuca orgánico. La Lucha, Lote Siete y Caribe lotes con sistema de cultivo de yuca convencional.

CMOCyO: contenido de materia orgánica color y olor; SAB: signos de actividad biológica; NDR: nivel de desarrollo radicular; ER: estado de residuos; Cel: compactación e infiltración; estructura; PS: profundidad del suelo; CES: control de la erosión del suelo; RH: retención de humedad y CS: cobertura de suelo.

En lo referente a los indicadores de salud del cultivo, se determinó que los cultivos con sistemas orgánicos obtuvieron valores que variaron de 5,00 y 10,00, con relación a los sistemas convencionales, que fueron entre 2,00 y 8,00; los mayores promedios se mostraron en los indicadores, en el aspecto del cultivo, en la diversidad de vegetal de cultivos y en el control de plagas (Figura 2). Según Estay (2021), esto se debe a que poseen suelos con mejor estado de conservación,

debido al equilibrio ecológico presente entre las condiciones agroclimáticas y el sistema; estos valores son concordante con los publicados por Savels *et al.* (2024), quienes evaluaron la influencia del manejo orgánico en el estado fitosanitario de cultivos pequeños en Flandes, Bélgica, reportando que estos sistemas obtuvieron promedios altos en los indicadores resiliencia (80), eficiencia (75), diversidad (73).

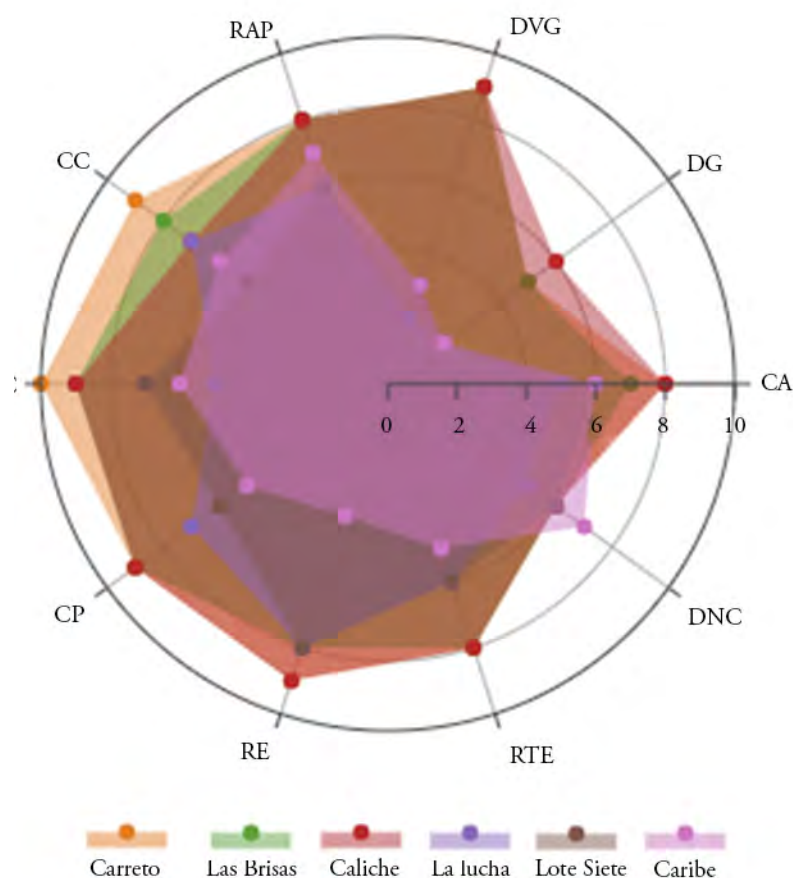


Figura 2. Diagrama de valores de indicadores de salud del cultivo. Lotes Carreto, Las Brisas y Caliche con sistema de cultivo de yuca orgánico. La Lucha, Lote Siete y Caribe lotes con sistema cultivos de yuca convencionales.

CA: Control de arvenses; DG: diversidad genética; DVG: diversidad de cultivos; RAP: rendimiento actual o potencial; CC: crecimiento del cultivo; AC: aspecto del cultivo; CP: control de plagas; RE: resistencia a enfermedades; RTE: resistencia o tolerancia a estrés y DNC: diversidad natural circundante.

Nivel de sostenibilidad de los agroecosistemas de yuca. El promedio obtenido con los indicadores de calidad de suelos y salud de cultivos muestra que las unidades de producción orgánica se encuentran por encima del umbral de sostenibilidad (5,00), con promedios de 8,25, 7,85 y 8,15, correspondientemente, mientras que las unidades de producción convencional se encuentran cerca o por debajo del umbral con promedios de 4,90, 5,30 y 5,15, respectivamente (Figura 3).

Estos resultados se podrían relacionar con los beneficios que genera la agricultura orgánica, caracterizada por el aporte de biofertilizantes, diversidad natural circundante, prácticas que

propician un mejor porcentaje de materia orgánica que, de acuerdo con el análisis de suelo, obtuvo promedios entre 1,80 y 2,53 % y respecto a los convencionales, de 0,32 a 1,23 % (Tabla 2). En conclusión, aumentan el contenido de minerales esenciales, favorece la actividad biológica, retención de humedad y la estructura del suelo (Altieri & Nicholls, 2017; Barrales-Brito *et al.* 2020).

En este sentido, Palestina-González *et al.* (2021) reportaron que pequeños sistemas de cultivo de la Región Alta del Yaonáhuac, Puebla-México, mostraron un índice de sostenibilidad entre intermedio a súper fuerte, con valores de 52,2 y 92,7, determinando que la aplicación de abonos orgánicos presentó influencia en el

rendimiento del cultivo. Por su lado, Tuesta *et al.* (2017) estudiaron la sostenibilidad de fincas con cultivo de cacao en San Martín, Perú, indicando que las fincas superaron el umbral de sostenibilidad, obteniendo para el sistema de producción orgánica un promedio

general de 6,90, respecto al sistema convencional, que fue de 6,38, concluyendo, que la condición fisicoquímica y biológica del suelo del sistema orgánico favoreció, en mayor medida, la productividad del cultivo.

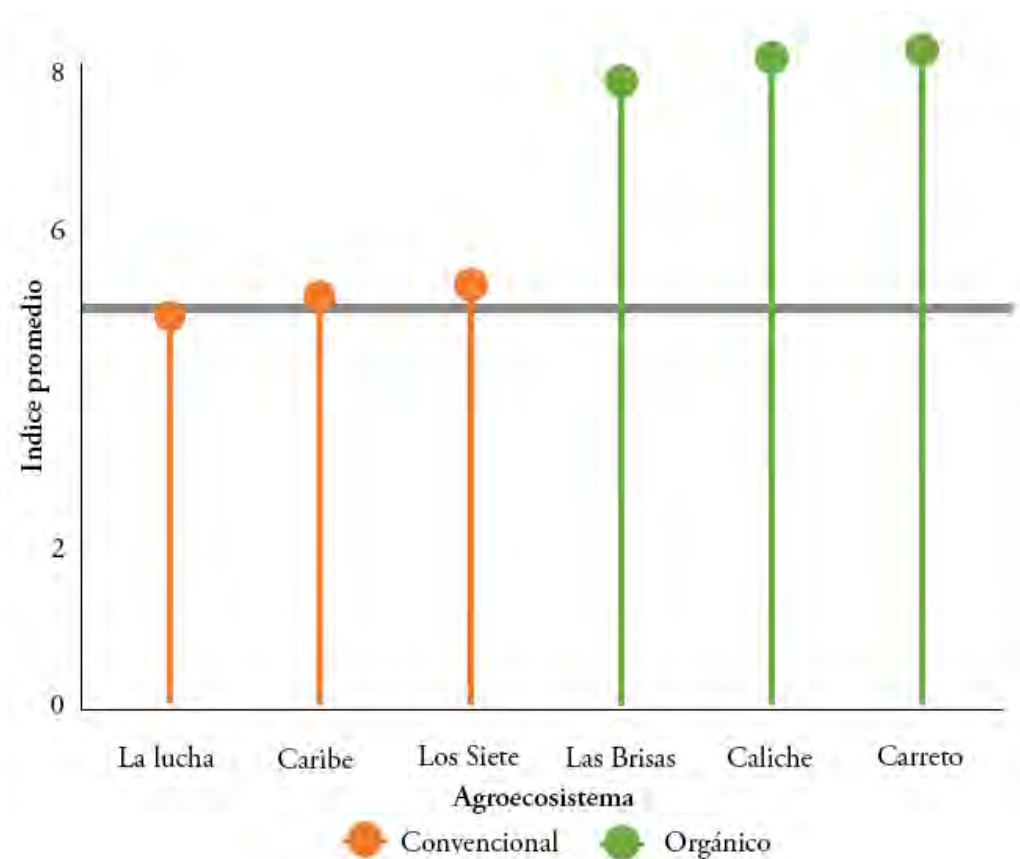


Figura 3. Índice general de los indicadores de sostenibilidad ecológica en agroecosistemas de yuca.

Carreto, Las Brisas y Caliche lotes con sistema cultivos de yuca orgánicos, La Lucha, Lote Siete y Caribe lotes con sistema cultivos de yuca convencionales.

Características fisicoquímicas del suelo. Los resultados de los análisis fisicoquímicos del suelo indicaron que el rango de variación del pH fue de fuertemente ácido a ligeramente ácido; contenidos de materia orgánica entre deficientes y medios; contenidos deficientes de P y S. Por último, los promedios obtenidos para Ca, Mg, K, Na fueron definidos entre medios y altos. La textura fue variable entre franco arcillosa, Franco y Franco- Arenoso, que se asocia a un mayor contenido de arcilla (Tabla 2).

En resumen, las características fisicoquímicas del suelo, según el criterio de Cadavid (2002), se encontraron dentro y por encima del nivel crítico de fertilidad de suelo específico, para el cultivo de yuca.

Por otra parte, las pruebas de respiración realizadas en los lotes indican mayores signos de actividad biológica, en los cultivares de yuca ecológica, con valores de 8,10; 8,66 y 8,44 kg/ha/día de CO₂, con relación a los convencionales, con valores 6,61, 6,75 y 7,02 kg/ha/día de CO₂ (Tabla 3), cuyos promedios están cercanos a los rangos normales de respiración, que se encuentran entre 10-100 kg/ha/día CO₂, según lo reportado por Gortaire Díaz *et al.* (2020).

Los valores obtenidos en los lotes orgánicos se atribuyeron a que se presentó asociación significativa ($p \leq 0,05$) entre los indicadores signo de actividad biológica y contenido de materia orgánica (Tabla 1), debido a que se presentó mayor tasa de descomposición que, generalmente, es asociada a la presencia de una mayor proporción de organismos en el suelo (Adekiya *et al.* 2019; Willer *et al.* 2022).

En cuanto a los cultivos de yuca convencionales, los indicadores de actividad biológica arrojan valores muy bajos, pues según Magaña Valenzuela *et al.* (2021), el uso de prácticas de basar en aplicación de agroquímicos sin aporte de materia orgánica, limitan la actividad de los organismos y microorganismos del suelo (Tabla 3).

Resultados similares fueron publicados por Marín *et al.* (2017), quienes encontraron mayor tasa de respiración en el suelo con tratamiento orgánico (0,247 mg/g/día CO₂), en correspondencia con el convencional (0,170 mg/g/día CO₂).

Tabla 2. Propiedades fisicoquímicas del suelo de las seis unidades de producción de yuca, en el municipio de Ciénaga de Oro, Corbona.

Propiedades físicoquímicas		Período seco					
		Lotes manejo orgánico			Lotes manejo convencional		
		Carreto	Las Brisas	Caliche	La Lucha	Lote Siete	Caribe
pH	(1:1)	6,25	6,32	5,25	5,67	5,89	5,13
M.O.	(%)	2,53	2,51	1,85	0,94	0,32	0,67
S	mg Kg ⁻¹	14,5	12,4	13,3	9,30	10,2	10,2
P		4,20	3,5	5,20	2,50	2,70	2,6
Ca	Cmolc Kg ⁻¹	8,60	10,5	6,50	4,50	4,60	5,00
Mg		7,50	4,20	3,30	3,60	0,80	2,50
K		0,77	0,77	0,76	0,70	0,64	0,70
Na			0,17	0,13	0,11	0,11	0,17
Al+H		--	--	0,2	--	--	0,36
CIC _e		17,07	15,64	10,89	8,91	6,15	8,73
Propiedades físicoquímicas		Período húmedo					
		Lotes manejo orgánico			Lotes manejo convencional		
		Carreto	Las Brisas	Caliche	La Lucha	Lote Siete	Caribe
pH	(1:1)	5,84	6,31	5,00	5,12	5,52	5,15
M.O.	(%)	2,18	2,24	1,80	1,23	0,47	0,84
S	mg Kg ⁻¹	10,45	9,65	10,20	7,70	9,40	10,6
P		5,40	3,90	4,70	2,80	2,30	2,20
Ca	Cmolc Kg ⁻¹	6,70	8,50	6,30	4,10	3,90	6,10
Mg		7,30	3,80	3,40	4,80	0,80	3,00
K		0,72	0,63	0,69	0,56	0,58	0,62
Na		0,15	0,12	0,12	0,15	0,09	0,23
Al+H		--	--	0,14	0,76	--	0,46
CIC _e		14,87	13,06	10,65	11,37	5,90	10,41
Textura		Franco arcilloso	Franco	Franco arenoso	Franco arcilloso	Arenoso franco	Franco arcilloso

Tabla 3. Prueba de respiración del suelo en los seis agroecosistemas de yuca, con sistemas de cultivo orgánico y convencional.

Unidad experimental	Cantidad de CO ₂ Kg/ha/día CO ₂ -C (25 °C)
Testigo	
Carreto	8,10
Las Brisas	8,66
Caliche	8,44
La Lucha	6,61
Lote Siete	6,75
Caribe	7,02

Con base en los resultados obtenidos, se concluyó que los sistemas de cultivo de yuca orgánicos del municipio de Ciénaga de Oro son un modelo de producción que representa una alternativa fiable para establecer en los sistemas agronómicos de la región y, de esta manera, mejorar los parámetros productivos.

La diversidad vegetal presente en los sistemas de producción orgánica de yuca representó el principal elemento que promovió la estabilidad del estado fitosanitario del cultivo, aspecto evidenciado en la capacidad de los mismos para mantener la autosostenibilidad, ante la presencia de factores causante de estrés, como la variación brusca del nivel de humedad en suelo, ataque de plagas, la cual, se fundamentó en la relación directa entre de la variedad de especies asociadas al cultivo y el aporte de materia orgánica al sistema.

El contenido de materia orgánica fue el indicador que más influyó en la calidad del suelo de los agroecosistemas de yuca; esta asociación positiva entre la aplicación de enmiendas orgánicas y condiciones fisicoquímicas y biológicas del suelo se manifestó en la ausencia visible de los efectos adversos, propios de la erosión hídrica y degradación química que, generalmente, son causados por el arrastre de suelo, acidificación y salinización.

Agradecimientos. A la Universidad de Córdoba, al Grupo de Investigación de Agricultura Sostenible de la Universidad de Córdoba y a los propietarios de las fincas, por el apoyo en la realización de la investigación. **Conflicto de intereses:** El artículo fue redactado y revisado con la participación de todos los autores, quienes manifiestan que no existe ningún conflicto de intereses que ponga en duda la validez de los resultados presentados. **Contribución autores:** Administración del proyecto por José Barrera. Reseña escrita y edición por Enrique Combatt. Conceptualización, supervisión y redacción por Luis De La Ossa.

REFERENCIAS

- ADEKIYA, A.O.; AGBEDE, T.M.; ABOYEJI, C.M.; DUNSING, O.; UGBE, J.O. 2019. Green manures and NPK fertilizer effects on soil properties, growth, yield, mineral and vitamin C composition of okra (*Abelmoschus esculentus* (L.) Moench). Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences. 18(2):218-223. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2017.05.005>
- ALEF, K.; NANNIPIERI, P. 1995. Methods in applied soil microbiology and biochemistry. Ed. Academic Press. Inglaterra. 576p.
- ALTIERI, M.A.; NICHOLLS, C.I. 2012. Diseños agroecológicos para potenciar el control biológico de plagas: incrementando la biodiversidad de entomofauna benéfica en agroecosistemas. Ed. Académica Española. Alemania. 80p.
- ALTIERI, M.A.; NICHOLLS, C.I. 2017. Agroecology: a brief account of its origins and currents of thought in Latin America. Agroecology and Sustainable Food Systems. 41(3-4):231-237. <https://doi.org/10.1080/21683565.2017.1287147>
- ALTIERI, M.A.; NICHOLLS, C.I. 2002. Sistema agroecológico rápido de evaluación de calidad de suelo y salud de cultivos en el agroecosistema de café. Manejo Integrado de Plagas y Agroecología. 64(3):17-24.
- ANWAR, S.; SANTOSA, E.; PURWONO. 2023. Cassava growth and yield on ultisol of different soil organic carbon content and NPK fertilizer levels. Jurnal Agronomi Indonesia. 51(3):312-323. <https://doi.org/10.24831/jai.v51i3.47806>
- BARRALES-BRITO, E.; PAZ-PELLAT, F.; ETCHEVERS-BARRA, J.D.; HIDALGO-MORENO, C.; VELÁZQUEZ-RODRÍGUEZ, A. 2020. Dinámica de carbono en agregados del suelo con diferentes tipos de usos de suelo en el monte Tlálloc, Estado de México. Terra Latinoamericana. 38:275-288. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i2.680>
- CADAVID, L.F. 2002. Suelo y fertilización para la yuca. En: Ospina, B.; Ceballos, H. La yuca en el tercer milenio. Sistemas modernos de producción, procesamiento, utilización y comercialización. Ed. Centro Internacional de Agricultura Tropical, CIAT. p.76-103.
- CAICEDO-CAMPOSANO, O.; SOPLÍN-VILLACORTA, H.; BALMASEDA-ESPINOSA, C.; CADENA-PIEDRAHITA, L.; LEYVA-VÁZQUEZ, M. 2020. Sustentabilidad de sistemas de producción de banano (*Musa paradisiaca* AAA) en Babahoyo, Ecuador. Revista investigación operacional. 41(3):379-388.
- CUENCA, K.I.; QUIZHPE, W.R.; RAMÍREZ-IGLESIAS, E. 2021. Evaluación de sustentabilidad en sistemas de producción de maíz y maní en la provincia de Loja, Ecuador. Agronomía Tropical. 71:1-13. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4567645>
- ESTAY, S.A. 2021. Bases Ecológicas para el Manejo de Plagas. Ed. Pontificia Universidad Católica de Chile. Chile. 162p.
- FONSECA-CARREÑO, N.E.; NARVÁEZ-BENAVIDEZ, C.A. 2020. Aplicación de la metodología MESMIS para la evaluación de sustentabilidad en sistemas de producción campesina en Sumapaz, Cundinamarca. Revista Ciencias Agropecuarias. 6(2):31-47. <https://doi.org/10.36436/24223484.318>
- GORTAIRE DÍAZ, D.; VANEGAS REDONDO, W.; CARVAJAL CAÑARTE, E.; ORTEGA PACHECO, D.; SANTOS ORDÓÑEZ, A. 2020. Análisis de sustentabilidad socioeconómica, productiva y ambiental de productores agroecológicos a pequeña escala en Manabí-Ecuador. Journal of Science and Research. 5(2):40-65. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.3820760>
- HOLDRIDGE, L. 2000. Ecología basada en zonas de vida. Ed. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, IICA. 225p.

- INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI, IGAC. 2006. Métodos analíticos del laboratorio de suelos. 6ª ed. IGAC. 513p.
- JÁCOME GÓMEZ, L.R.; CARRILLO CRUZ, A.I. 2020. Efecto de la fertilización química en el cultivo de yuca (*Manihot esculenta* Crantz) en Santo Domingo de los Tsáchilas. Revista de Investigación Científica TSE'DE. 3(2):87-98.
- LÓPEZ-LÓPEZ, R.; RAMÍREZ-GUILLERMO, M.A.; MARTÍNEZ-HERRERA, J.; CÁMARA-CÓRDOVA, J.; DURÁN-PRADO, A. 2018. Respuesta de la yuca para raíz *Manihot esculenta* Crantz a la fertilización mineral con NPK en un Acrisol Húmico de Tabasco. UJAT. En: Martínez Herrera, J.; Ramírez Guillermo, M.A.; Cámara-Córdova, J. Investigaciones Científicas y Agrotecnológicas para la Seguridad Alimentaria. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. México. p.114-123.
- MAGAÑA VALENZUELA, W.; OBRADOR OLÁN, J.J.; GARCÍA LÓPEZ, E.; CASTELÁN ESTRADA, M.; CARRILLO ÁVILA, E. 2021. Rendimiento comparativo de la yuca bajo fertilización mineral y abono verde. Revista mexicana de ciencias agrícolas. 11(6):1259-1271. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i6.2202>
- MARÍN, S.; BERTSCH, F.; CASTRO, L. 2017. Efecto del manejo orgánico y convencional sobre propiedades bioquímicas de un andisol y el cultivo de papa en invernadero. Agronomía Costarricense. 41(2):27-46. <http://dx.doi.org/10.15517/rac.v41i2.31298>.
- MARULL, J. 2005. Metodologías paramétricas para la evaluación ambiental estratégica. Ecosistemas. 14(2):97-108.
- MASERA, O.R.; ASTIER, M.; LÓPEZ-RIADURA, S. 1999. Sustentabilidad y manejo de recursos naturales: El Marco de evaluación MESMIS. Ed. Mundiprensa-GIRA-UNAM. México D.F. 101p.
- ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA, FAO. 2020. Faostat. Disponible desde Internet en: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>
- PALESTINA-GONZÁLEZ, M.I.; CARRANZA-CERDA, I.; LÓPEZ-REYES, L.; TORRES, E.; SILVA-GÓMEZ, S.E. 2021. Sustainability assessment of traditional agroecosystems in the high region of Yaonáhuac, Puebla, Mexico. Environments. 8:40. <https://doi.org/10.3390/environments8050040>
- PORTA, J.; LÓPEZ-ACEVEDO, M.; ROQUERO, C. 2019. Edafología: uso y protección de suelos. Ed. Mundi-Prensa. España. 541p.
- SARANDÓN, S.J.; FLORES, C.C. 2009. Evaluación de la sustentabilidad en agroecosistemas: una propuesta metodológica. Agroecología. 4:19-28.
- SAS. 2012. Statistical Analysis System, User's Guide. Statistical. Version 9.1th ed. SAS. Inst. Inc. Cary. N.C. USA.
- SAVELS, R.; DESSEIN, J.; LUCANTONI, D.; SPEELMAN, S. 2024. Assessing the agroecological performance and sustainability of Community Supported Agriculture farms in Flanders, Belgium. Frontiers in Sustainable Food Systems. 8:1359083. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1359083>
- SEPÚLVEDA-VARGAS, R.D. 2020. Economía y agroecología. Construyendo alternativas al desarrollo rural. Ed. Universidad Pontificia Bolivariana. Colombia. 217p.
- SOIL SURVEY STAFF. 2022. Keys to soil taxonomy. Ed. USDA. Natural Resources Conservation Service (U.S.A). 101p.
- TUESTA, O.; SANTISTEVAN, M.; BORJAS, R.; CASTRO, V.; JULCA, A. 2017. Sustentabilidad de fincas cacaoteras en el distrito de Huicungo San Martín, Perú con el "Método Agroecológico Rápido". Peruvian Journal of Agronomy. 1(1):8-13. <https://doi.org/10.21704/pja.v1i1.1062>
- WILLER, H.; JAN, T.; CLAUDIA, M.; BERNHARD, S. 2022. The world of organic agriculture. statistics and emerging trends. Bonn 2019. Research Institute of Organic Agriculture FiBL., Frick, and International Federation of Organic Agriculture Movements IFOAM-Organics International. p.174-214.
- ZHANG, Y.; FENG, Y.; GAO, Y.; WU, J.; TAN, L.; WANG, H.; WANG, R.; NIU, X.; CHEN, Y. 2023. Effects of an organic amendment on cassava growth and rhizosphere microbial diversity. Agriculture. 13:1830. <https://doi.org/10.3390/agriculture13091830>

Efecto del régimen de humedad del suelo sobre la producción del zapallo *Cucurbita moschata* Duchesne

Effect of soil moisture regime on the production of butternut squash *Cucurbita moschata* Duchesne

Robert Augusto Rodríguez-Restrepo^{1*} ; Harold Tafur-Hermann² ; Sanin Ortiz-Grisales² ; Magda Piedad Valdés-Restrepo¹ 

¹Universidad Nacional Abierta y a Distancia. Palmira - Valle del Cauca, Colombia; e-mail robert.rodriguez@unad.edu.co; magda.valdes@unad.edu.co

²Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira, Palmira - Valle del Cauca, Colombia; e-mail: htafurh@unal.edu.co; sortizg@unal.edu.co.

*autor para correspondencia: robert.rodriguez@unad.edu.co

Cómo citar: Rodríguez-Restrepo, R.A.; Tafur-Hermann, H.; Ortiz-Grisales, S.; Valdés-Restrepo, M.P. 2024. Efecto del régimen de humedad del suelo sobre la producción y calidad del zapallo *Cucurbita moschata* Duchesne. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 27(2):e2477. <http://doi.org/10.31910/rudca.v27.n2.2024.2477>

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 17 de 2023

Aceptado: agosto 30 de 2024

Editado por: Helber Adrián Arévalo Maldonado

RESUMEN

El cultivo de zapallo *Cucurbita moschata* Duchesne ha cobrado interés por el alto valor nutricional del fruto; sin embargo, en las regiones productoras de Colombia, el riego para el zapallo es una labor empírica, dado que en el país no existen estudios que asocien el efecto del riego sobre la producción del fruto. Por lo tanto, se estudió el efecto del régimen de riego sobre la producción de tres cultivares de zapallo. Se aplicaron cinco láminas de riego con base en: Kc del cultivo (0,4; 0,6; 0,8; 1,0 y 1,2) a tres cultivares de Zapallo: UnapaL-Abanico-75 (A75), Unapal-Bolo Verde (Bv) y Unapal-Dorado (Dr), con ocho repeticiones, para un total de 96 plantas. El diseño experimental fue parcelas divididas, donde la parcela principal fue el tratamiento de riego y la subparcela, los cultivares. Los caracteres frutos por planta (FPP), peso promedio del fruto (PPF), producción por planta (PPP), materia seca (MS) y espesor de pared de pulpa (EP) presentaron diferencias altamente significativas, de acuerdo con el régimen de riego, asociadas, en modo positivo, con nivel de Kc más alto (1,2).

Palabras clave: Ahuyama; Coeficiente de Cultivo (Kc); Humedad del suelo; Riego por goteo; Textura del suelo.

ABSTRACT

The crop of *Cucurbita moschata* Duchesne has gained interest due to the high nutritional value of the fruit; however, in the producing regions of Colombia, irrigation for squash is an empirical task given that in the country, there are no studies that associate the effect of irrigation on fruit production. Therefore, the effect of the irrigation regime on the production of three pumpkin cultivars was studied. Five irrigation sheets were applied based on: Kc of the crop (0.4; 0.6; 0.8; 1.0 and 1.2) to three Zapallo cultivars: UnapaL-Abanico-75 (A75); Unapal-Bolo Verde (Bv) and Unapal-Dorado (Dr) with eight repetitions for a total of 96 plants. The experimental design was divided plots, where the main plot was the irrigation treatment, and the subplot was the cultivars. The characteristics of fruits per plant (FPP), average fruit weight (PPF), production per plant (PPP), dry matter (DM), and pulp wall thickness (EP) presented highly significant differences according to the irrigation regime, positively associated with higher Kc level (1.2).

Keywords: Crop coefficient; Drip irrigation; Pumpkin; Soil moisture; Soil texture.

INTRODUCCIÓN

El zapallo *Cucurbita moschata* Duchesne juega un papel importante en la economía y la seguridad alimentaria en América Latina, por su plasticidad agronómica y versatilidad culinaria. En el sector agroindustrial destaca por el alto contenido de proteína cruda (14,5 %), alta presencia de minerales, como calcio, hierro, fósforo y de vitamina A, en forma de carotenos totales (535 µg/g) (Rodríguez *et al.* 2018). Su relevancia en la agroindustria se refleja en el área cultivada en el mundo, donde las cifras más recientes indican que se ha incrementado significativamente, pasando de 1'746.293 ha, en 2010, a 2'004.058 ha, en 2020, siendo el continente asiático el principal productor, seguido de África y las Américas (FAOSTAT, 2024).

En Colombia, la mayor producción de zapallo se registra en el departamento de Santander, seguido de Cesar y Valle del Cauca, regiones donde los suelos predominantes son del orden molisol, inceptisol, entisol y vertisol, cuya variabilidad en características físicas y químicas condiciona la disponibilidad de agua para los cultivos (Agronet, 2024).

La agricultura en Colombia es uno de los principales pilares de la economía del país, actividad cuya demanda hídrica se estima como el 46,6 % del total nacional; sin embargo, los agricultores no solo compiten por el agua con los centros urbanos y las industrias, sino, también, con el ambiente, ya que el cambio climático modifica el régimen de precipitación anual y la temperatura, generando estrés térmico e hídrico, con una consecuente reducción significativa en el rendimiento de los cultivos, dado que las plantas presentan respuestas de evitación y de tolerancia al estrés abiótico, características que guardan una relación inversa con la producción de biomasa, por lo cual, uno de los enfoques de la investigación agrícola es determinar los requerimientos hídricos del cultivo, incrementando la eficiencia del riego, obteniéndose mejores producciones a menor costo (Zhang *et al.* 2023).

La bibliografía actualizada sobre los requerimientos hídricos del zapallo es escasa y la que se encuentra disponible, corresponde a investigaciones realizadas en otras cucurbitáceas, principalmente, pepino y melón, en regiones del planeta, cuyas condiciones climáticas no se ajustan a las encontradas en el trópico colombiano, lo cual, genera incertidumbre en los productores locales respecto a cuándo y cuánto regar, lo que deriva en sobrecostos de producción.

Investigaciones relacionadas evidencian el efecto benéfico del incremento de la lámina de riego, sobre las variables de rendimiento, como número de frutos, peso del fruto y rendimiento por planta, en plantas de pepino (Hashem *et al.* 2011; Zhang *et al.* 2023; Ding *et al.* 2023). La respuesta es similar en plantas de melón; Visconti *et al.* (2019) y Yavuz *et al.* (2021) plantearon que mantener un régimen de humedad del suelo por debajo de capacidad de campo maximizaría la acumulación de azúcar en frutos de melón. Encontraron que el estrés hídrico provocado disminuyó la acumulación de azúcar en fruto y, a su vez, todas las variables de rendimiento. Por lo tanto, es imperativo mantener las plantas sin estrés hídrico desde la floración

hasta el final de la cosecha, para maximizar el rendimiento y la calidad del fruto.

Considerando lo anterior, el objetivo de la presente investigación fue determinar el efecto del régimen de humedad del suelo sobre la producción de tres cultivares de zapallo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización. La investigación se realizó en la granja Mario González Aranda (GMGA), de la Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira, Valle del Cauca, N 3°30'26,8"; O 76°18'47,6" y 998 m s.n.m., 24 °C, 72 % (HR) y precipitación pluvial anual de 1.000 mm, que corresponde a una zona de bosque seco tropical.

Se desarrollaron dos ensayos de campo consecutivos, en los semestres 2019-II y 2020-I. El área experimental se trabajó bajo una cubierta plástica de diseño cenital, sin paredes laterales, que ocupó una superficie de 900 m².

El orden taxonómico de los suelos de la GMGA es Pachic-Haplustoll, cuyas principales características fisicoquímicas son: densidad aparente (DA) 1,2 g/cm³; textura franco-arcillo-limosa, materia orgánica (M.O.) 3,2 %, fósforo (P) 215 mg/kg y potasio (K) 0,45 cmol/kg.

Caracterización climática. La información climática para las variables, temperaturas máximas y mínimas (°C), humedad relativa (%), radiación solar (kW h m²) y velocidad del viento (km/hora), se midieron diariamente, consultando una estación climatológica portátil DAVIS, Vantage pro-2. Esta información fue contrastada con una base de datos climatológicos de 30 años atrás, provenientes de la estación agroclimatológica PALMIRA ICA con código 26075010, descargados del portal del IDEAM (2020).

Material biológico. Las semillas de los cultivares de zapallo Unapal Abanico-75 (A75), Unapal Dorado (Dr) y Unapal Bolo verde (Bv) provienen del grupo de investigación mejoramiento genético, agronomía y producción de semillas de hortalizas (PMGAPSH) de la Universidad Nacional de Colombia. Se realizó un semillero en vasos de 12 onzas, con dos semillas por vaso, usando suelo de la GMGA como sustrato; 15 días después se trasplantó a campo la plántula con mayor vigor.

Descripción de las unidades experimentales. La unidad experimental consistió en una planta de zapallo por tratamiento de riego (Kc) y cultivar, con 8 repeticiones. La distancia de siembra fue 2,5 x 2,5 m, para una densidad de 1.600 plantas ha⁻¹.

Tratamientos de riego. Se evaluaron cuatro tratamientos de riego por semestre, considerados como coeficientes del cultivo Kc, a saber: 0,4, 0,6, 0,8 y 1,0, en el semestre 2019-II y 0,6, 0,8, 1,0 y 1,2, para el semestre 2020-I.

La frecuencia de riego estuvo condicionada por el balance hídrico del suelo (ΔHS) (Ecuación 1), sin efecto de la precipitación

por acción de la cubierta plástica. Se descartó el aporte freático mediante muestreos, a 1,5 y 2 m de profundidad con barreno de extensión. Se empleó riego por goteo, con emisores con caudal de 2 l/h (Ecuación 2).

La evapotranspiración de referencia (ET_0) se estimó como el producto entre la evaporación del tanque clase A y el coeficiente de ajuste (K_p) (Ecuación 3), el cual, se determinó acorde con la velocidad del viento y la humedad relativa de la zona de estudio; la lectura del tanque se registró diariamente a las 7:00 a.m. Se estimó la evapotranspiración del cultivo (ET_c), multiplicando cada K_c por la ET_0 (Ecuación 4). El volumen de agua a regar se calculó mediante el producto entre ET_c y la franja a humedecer (2,5 m ancho del surco x 45 m largo del surco) (Ecuación 5). El tiempo de riego se controló mediante válvulas de cortina accionadas manualmente. Éste se determinó como la relación entre el volumen de riego y el caudal del gotero (2l/h) (Ecuación 6). El contenido de humedad del suelo se estandarizó, mediante un riego abundante 48 horas antes de iniciar el experimento.

$$\Delta HS = (P + R + NF) - (E_v + T + P) \quad \text{ecuación 1}$$

$$\Delta HS = R - ET_c \quad \text{ecuación 2}$$

$$ET_0 = K_p \cdot Ev_A \quad \text{ecuación 3}$$

$$ET_c = (K_p \cdot Ev_A) \cdot K_c \quad \text{ecuación 4}$$

$$\text{Volumen} = ((K_p \cdot Ev_A) \cdot K_c) \cdot \text{franja humedecida} \quad \text{ecuación 5}$$

$$\text{Tiempo de riego} = \frac{((K_p \cdot Ev_A) \cdot K_c) \cdot \text{franja humedecida}}{\text{Caudal de los goteros } (2\frac{l}{h})} \quad \text{ecuación 6}$$

Dada la fisiología de crecimiento de la planta de zapallo, así como la distribución de raíces (pivotante y tallos decumbentes), cada planta contó con manguera de 16 mm dispuesta en forma espiral de hasta 5 anillos, espaciados a 15 cm, activados mediante válvulas de cortina, acorde con la etapa fenológica.

Aplicación de fertilizantes. La aplicación de los fertilizantes se realizó por drench, con base en el análisis de suelo y el plan de fertilidad del PMGAPSH para zapallo (N 225; P_2O_5 125; K_2O 250 kg/ha), fraccionados en tres eventos, según las etapas fenológicas de la planta: germinación-floración; floración-fructificación y fructificación-cosecha.

Variables de respuesta. Las variables de respuesta evaluadas fueron: frutos por planta (FPP) (kg), peso promedio del fruto (PPF) (kg), producción por planta, espesor de pulpa (EP) (cm), color de la pulpa (CP), número de semillas por fruto (NSF) (gramos) y peso unitario PUS (peso de 100 semillas en gramos).

Análisis estadístico. Se evaluaron un total de 12 tratamientos, resultantes de la interacción entre 3 cultivares de zapallo y 4 tratamientos de riego por ciclo evaluado, con 8 repeticiones, para un total de 96 plantas por ciclo; el diseño experimental fue parcelas divididas. Para la comparación de medias se empleó la prueba de Duncan, con un nivel de significancia del 5 %. La información se analizó mediante el paquete estadístico R.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los datos climatológicos, condensados en la tabla 1, muestran que las temperaturas diarias, radiación solar y evaporación del tanque clase A, registradas durante la prueba II, fueron más altas que las registradas durante la prueba I. En contraste, la humedad relativa promedio durante la prueba I fue más alta que la registrada en la prueba II, lo que supone una demanda hídrica atmosférica mayor durante el periodo enero-abril, dadas las altas temperaturas, la acción del viento y la consecuente menor saturación de vapor del aire (HR), condiciones que afectan el poder evaporante de la atmósfera, por lo que el suelo se seca más rápido entre aplicaciones de agua, necesiándose mayor frecuencia del riego.

Tabla 1. Promedios mensuales para las variables climatológicas consideradas en el estudio.

Mes	Tmin	Tmax	Tprom	HR	Rs	Vv	EtA
Julio	18,9	30,4	24,65	78	5907	1,2	4,2
Agosto	20,0	29,8	24,90	73	5651,1	3,6	4,6
Septiembre	20,6	34,5	27,55	75	4821,0	1,1	4,0
Octubre	20,1	33,6	26,85	73	5430,8	1,4	4,3
Enero	19,7	35,6	27,65	71	6502,8	1,8	4,3
Febrero	21,1	33,7	27,40	71	5969,7	1,5	4,7
Marzo	17,8	34,3	26,05	69	5607,1	1,5	4,5
Abril	16,5	32,8	24,65	72	5956,2	2,6	4,6

Donde: prueba I (julio-octubre) y prueba II (enero-abril). Tmin: temperatura mínima ($^{\circ}C$), Tmax: temperatura máxima ($^{\circ}C$), Tprom: temperatura promedio ($^{\circ}C$), HR: Humedad relativa (%), Rs: Radiación solar (KWh/m^2), Vv: Velocidad del viento ($Km/día^{-1}$), EtA: Evapotranspiración medida en el tanque clase A ($mm.d^{-1}$).

Contenido de humedad del suelo. El contenido de humedad del suelo para todos los tratamientos de riego, en principio, mostró valores lógicos por encima de capacidad de campo (CC), inmediatamente después del riego y en la medida que el suelo drenó, se alcanzó el contenido de humedad a CC. El poder evaporante de la atmosfera hizo que la humedad disminuyera en los primeros centímetros hasta los valores presentados en la tabla 2, que corresponden al contenido de humedad del suelo por tratamiento antes del riego. En los primeros diez centímetros, los tratamientos Kc: 1,0 y 1,2, llegan a CC (30,60 % a 0,3 bar), sosteniéndose este nivel de humedad hasta los 30 centímetros, lo cual, es un hallazgo importante, dado que abarca la profundidad efectiva de raíces para el cultivo, generando condiciones adecuadas para la toma de nutrientes. En contraste, los tratamientos de Kc: 0,4 y 0,6, se consolidan como deficitarios, dado que antes del riego o hasta 30 cm de profundidad, la humedad en el suelo bajó ostensiblemente del valor referencial de CC. Bajo esta condición, el agua se encuentra retenida a una tensión muy alta, lo que representa mayor estrés para la planta. Esta condición deficitaria de humedad hace activar mecanismos de adaptación a la planta, comprometiendo la producción (Tablas 4 y 5).

Efecto del riego sobre la producción por planta. Respecto al riego (Kc) se presentaron diferencias significativas ($P < 0,05$) en ambas pruebas, en los componentes principales de la producción por planta. Los cultivares de zapallo (Cul) respondieron significativamente ($p < 0,05$) en ambas pruebas, para las variables FPP y PPF; no obstante, la PPP respondió significativamente en la prueba II. La interacción entre el riego y los cultivares de zapallo (KcxCul) solo evidenció respuesta significativa ($p < 0,05$), en las variables FPP y PPF de la prueba I (Tabla 3).

Las variables de la producción por planta se beneficiaron con el incremento en el contenido de humedad del suelo de la prueba II, encontrándose el mayor número de FPP y PPF, para el cultivar Bv. El mejor EP lo obtuvo en A75, seguido de Dr y Bv, con valores de 5,18, 4,6 y 4,56 cm, respectivamente (Tablas 4 y 5).

El Kc: 1,2, supuso la mejoría en la producción de los cultivares estudiados; Bv mostró el mayor número de FPP y, en consecuencia, la mayor PPP, con 30,35 kg, superior en 53 % a Baena *et al.* (2010). Dr mejoró un 36,2 % su PPP respecto a Estrada *et al.* (2010).

Tabla 2. Contenido de humedad del suelo a tres profundidades antes de riego para cada tratamiento de riego.

Prof.(cm)	Humedad (%)				
	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2
0-10	20,30	21,10	22,40	24,60	26,18
10-20.	21,20	22,40	24,30	27,70	30,70
20-30	23,30	25,12	26,30	29,20	30,50

Tabla 3. Cuadros medios para componentes de la producción en zapallo en las pruebas I y II.

Prueba	Fuentes de variación	GL	FPP	PPF (Kg)	PPP (Kg)	EP (cm)	NSPF	PUS
I	Kc	3	7,42**	23,88**	119,16*	0,34*	1320,06**	2,73 ns
	Cul	2	0,19**	1,71**	17,30 ns	0,09 ns	457,32 ns	3,01 ns
	Kc x Cul	12	0,39**	0,32**	3,63 ns	0,11 ns	185,73 ns	5,51 ns
	CV		26,34	38,84	53,26	17,49	19,4	14,68
II	Kc	3	11,76*	16,03**	119,16*	4,87*	32831,84*	0,59 ns
	Cul	2	17,63*	1,49*	410,11**	1,13 ns	1576,88 ns	2,04 ns
	Kc x Cul	12	0,79 ns	0,47 ns	19,93 ns	0,31 ns	4049,05 ns	3,63 ns
	CV		41,39	28,08	53,69	16,02	25,12	17,48

FPP: Frutos por planta; PPF: Peso promedio del fruto (Kg); PPP: Producción promedio por planta (Kg); EP: Espesor de pulpa(cm); NSPF: Número de semillas por fruto; PUS: Peso unitario de semilla (o peso de 100 semillas).

Tabla 4. Componentes de la producción del fruto en UNAPAL; Abanico-75; Bolo verde y Dorado, para la prueba I.

Cultivar	Variables de respuesta							
	KC	EUA	FPP	PPF	PPP	EP	NSPF	PUS
Ab-75	0,4	22,503	2,25d	1,78d	3,96d	2,52c	534,75a	9,25c
	0,6	24,414	3,12c	1,96c	6,44c	2,61c	416,37b	11,62b
	0,8	30,745	3,5b	3,10b	10,82b	3,2b	380,2c	11,62b
	1.0	34,97	4,12a	3,79a	15,38a	3,6a	390,25c	12,37a
Bv	0,4	32,393	2,87d	1,85d	5,70c	2,76c	576,25a	8,67c
	0,6	30,967	3,25c	2,54c	8,17c	2,97c	462,37b	11,75b
	0,8	35,169	3,37b	3,65b	12,37b	3,28b	394,62c	11,12b
	1.0	36,446	3,87a	4,19a	16,03a	3,75a	385,12c	13,00a
Dr	0,4	25,234	2,75c	1,58d	4,44d	2,67d	531,5a	9,21c
	0,6	31,03	2,62c	3,03c	8,19c	2,96c	471,37b	11,25b
	0,8	39,37	3,35b	3,68b	13,85b	3,16b	399,87c	11,5b
	1.0	32,495	3,92a	3,94a	14,29a	3,7a	378,00c	12,5a

Donde: Ab-75: Abanico- 75; Bv: Bolo verde; Dr: Dorado; EUA: Eficiencia en el uso del agua (Kg/m^3); FPP: Frutos por planta; PPF: Peso promedio del fruto (Kg); PPP: Producción promedio por planta (Kg); EP: Espesor de pulpa(cm); NSPF: Número de semillas por fruto; PUS: Peso unitario de semilla (o peso de 100 semillas).

Tabla 5. Componentes de la producción y calidad del fruto en UNAPAL; Abanico-75; Bolo verde y Dorado, para la prueba II.

Cultivares	Variables de respuesta							
	KC	EUA(Kg/m^3)	FPP	PPF(Kg)	PPP(Kg)	EP(cm)	NSPF	PUS(g)
Ab-75	0,6	37,03	4,5b	2,62d	11,88c	3,56b	446,87a	10,37c
	0,8	28,54	3,87c	3,12c	12,21c	4,2a	350,5b	11,62b
	1.0	38,92	5,25a	3,95b	20,82b	4,5a	330,75b	11,5b
	1,2	40,96	5,87a	4, 93 ^a	28,93a	5,18a	388,01c	14,5a
Bv	0,6	60,6	4,25d	3,06c	19,45c	3,12c	450,87a	10,00c
	0,8	44,44	5,04c	3,95b	19,0c	3,52b	345,75b	11,75b
	1.0	46,52	6,25b	4,07b	24,88b	3,612b	374,87a	11,62b
	1,2	47,43	6,87a	5,33a	30,45a	4,56a	323,5b	13,87a
Dr	0,6	22,81	3,87c	1,93d	7,32d	3,87b	405,5a	10,37c
	0,8	34,88	4,5b	3,20c	14,93c	3,5b	364,25b	11,12b
	1.0	40,21	5,37a	4,01b	21,51b	4,00b	376,00b	11,37b
	1,2	36,62	5,25a	4,50 ^a	23,51a	4,6a	404,87a	13,12a

Donde: Ab-75: Abanico- 75; Bv: Bolo verde; Dr: Dorado; EUA: Eficiencia en el uso del agua (Kg/m^3); FPP: Frutos por planta; PPF: Peso promedio del fruto (Kg); PPP: Producción promedio por planta (Kg); EP: Espesor de pulpa(cm); NSPF: Número de semillas por fruto; PUS: Peso unitario de semilla (o peso de 100 semillas).

La mejoría en las variables de producción en respuesta a dosis óptimas de riego ha sido ampliamente documentada en investigaciones similares con cucurbitáceas; Çakir *et al.* (2017) combinaron dos frecuencias de riego (2 días y 4 días), con cuatro coeficientes de cultivo (Kc 0,75, Kc 1,0, Kc 1,25 y Kc 1,5), en plantas de pepino de tipo mini, encontrando que el mayor rendimiento se produjo regando con una frecuencia de 2 días y el Kc de 1,5.

En el presente estudio, los volúmenes acumulados de evapotranspiración para cada tratamiento de riego, variaron de 195,52; 293,28; 391,04 y 488,8 m^3/ha durante la prueba I, a

356,64, 475,52, 594,4 y 713,28 m^3/ha . Los volúmenes para los Kc de 0,8 y 1,2 (Prueba II) superan los 400 m^3/ha por ciclo de riego para zapallo, recomendado por Estrada *et al.* (2004), en condiciones de Palmira, Valle del Cauca; sin embargo, esta recomendación carece de fundamento experimental derivado de una prueba de necesidades hídricas; a su vez, este incremento en la oferta hídrica en la prueba II favoreció ampliamente las variables de rendimiento, como FPP, PPF, PPP y EP (Tabla 5). Por tal motivo, se puede considerar que las necesidades hídricas del cultivo de zapallo para condiciones de suelo y clima similares a las empleadas en el presente experimento, corresponden a 713,28 mm/ha , fraccionados de la

siguiente manera: en la fase de establecimiento del cultivo, que dura 0 a 30 días, se aplica una lámina de 124,8mm; la segunda etapa (30 a 60 DDS), 147,84 mm y la tercera, cuya duración es de 90 días, se aplican en total 440,64mm (Figura 1).

La Kc 0,4 derivó en un estrés hídrico evidente en la pérdida de turgencia en las hojas. En particular, las plantas de zapallo son sensibles al déficit de agua, escenario que provoca la caída de flores y frutos (Alsaedi *et al.* 2019), dado que cuando se presenta estrés hídrico, se reduce la apertura estomática, lo que disminuye la cantidad de fotoasimilados, disponibles para llenar todos los frutos en desarrollo; por ende, los frutos más jóvenes son los que

tienen más probabilidad de ser abortados y solamente los frutos de mayor edad maduran, pero, quizá, no están suficientemente llenos (Alomran & Luki, 2012).

La textura del suelo es franco arcillo limoso, lo que indicó buenas condiciones de drenaje y de retención de humedad, dada la alta presencia de microporos, lo que pudo favorecer la toma de nutrientes y, por ende, mostrar el mejor efecto de los tratamientos de riego, conjetura a la que llegaron Li *et al.* (2018), cuando evaluaron distintas láminas de riego en sandía, bajo condiciones de suelo similares.

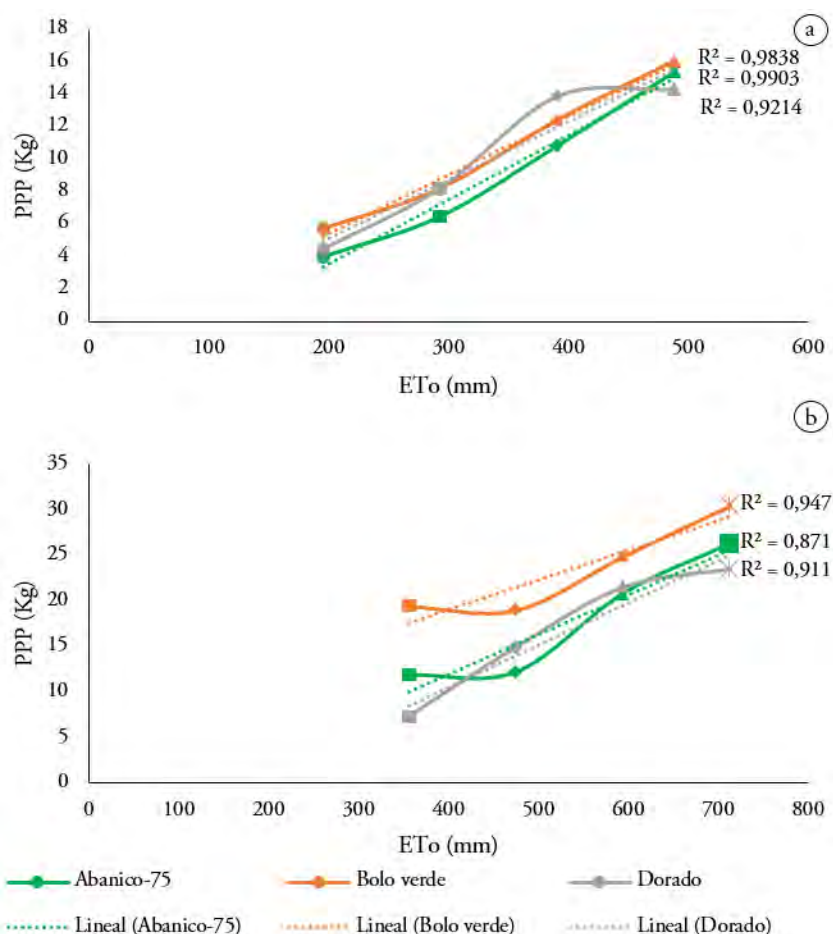


Figura 1. Correlación entre la producción promedio por planta y la evapotranspiración del cultivo, de tres cultivares de zapallo, en dos pruebas: a) Prueba I; b) Prueba II.

El buen desempeño de las variables de rendimiento, probablemente, esté asociado al sistema de riego por goteo, adaptado a la fisionomía del zapallo, lo cual, redujo la lixiviación de nitratos, promovida por excesivas láminas de riego, tal como lo propone Amer (2011), que tras comparar el riego por goteo y por gravedad en *Cucurbita pepo*, concluyó que el riego por gravedad no solo incrementa el volumen de riego a reponer al suelo, sino, también, favorece la pérdida de nutrientes en la zona efectiva de raíces, que disminuyen el rendimiento.

Efecto del riego sobre la producción de semillas. El mayor NSF se produjo con el riego deficitario. Esto supone una posible nueva vocación para los cultivares de *C. moschata*, como productor de semillas a bajo costo de riego, dado su alto consumo como snack, en países del continente asiático (FAOSTAT, 2024).

En contraste al NSF, el PUS expresó mejor resultado con el incremento en el contenido de humedad del suelo; A-75, con 14,5g, fue el mejor cultivar. Otras investigaciones sobre riego en

Cucurbitaceas muestran contrastes para esta variable; Seymen *et al.* (2019), 246g, para *Cucurbita pepo*; 178 g y 239 g, por Türkmen *et al.* (2016), lo que sugiere, que ante condiciones de humedad del suelo adecuadas para la fotosíntesis, la planta tiene oportunidad de acumular mayor cantidad de almidón en la semilla, que representa una parte importante del peso seco.

Eficiencia del uso del agua (EUA). La EUA representa la productividad del agua relacionada con el rendimiento. La EUA se vio significativamente afectada por el riego, creciendo a la par del tratamiento Kc (Tablas 4 y 5). Los mayores registros se presentaron en la prueba II, donde el cultivar Bv, se destacó con 60,6 kg/m³, bajo Kc 0,4. En contraste, los cultivares A-75 y Dr presentaron su mejor valor de EUA, con el Kc de 1,2 (40,9 y 36,6 rkg/m³).

El tratamiento 0,4 (Deficitario) tuvo una EUA más alta que la de los demás tratamientos; sin embargo, su rendimiento fue el más bajo en comparación con los demás. Con base en los resultados, se puede relacionar la EUA y la PPP de manera lineal durante ambas pruebas (I y II), similar al comportamiento del rendimiento de sandía y la EUA encontrado por Wang *et al.* (2014). Esta alta EUA, probablemente, esté asociada al sistema de riego por goteo que se adaptó a la fisiología del zapallo y permitió entregar, de manera más eficiente, el agua a las guías o ramas, provistas de raíces decumbentes, que nutren al mayor número de flores pistiladas, que dan origen a los frutos. La anterior hipótesis encuentra asidero en Mao *et al.* (2013), quienes plantean lo siguiente: “después de la aparición de la fruta del pepino en los tallos, florecieron más plantas de pepino y aparecieron más frutos. Las plantas necesitaron más agua para satisfacer las necesidades de frutas más suculentas y una mayor evaporación del suelo, como resultado de una temperatura más alta, de modo que el requerimiento de agua aumentó dramáticamente”. Rahil & Qanadillo, (2015) mencionan que la EUA más baja se puede atribuir al hecho de que se aplicó una gran cantidad de agua de riego bajo el criterio de la observación y del estado fisiológico de la planta.

Hashem *et al.* (2011) mencionan que, pese a que la eficiencia en el uso del agua es un indicador importante, también se debe considerar que el rendimiento es la principal variable penalizada ante el riego deficitario, por lo tanto, debe ser considerada como una guía real del manejo del agua para el cultivo.

Se concluye que para los tres cultivares de zapallo en prueba, los componentes de rendimiento se incrementaron positivamente con el aumento de la oferta hídrica, a excepción del número de semillas por planta, que expresó su mayor potencial con el tratamiento de riego deficitario.

La producción de semillas por planta expresó una relación positiva con el aumento de la oferta hídrica, en orden de superioridad Abanico-74, Dorado y Bolo Verde, respectivamente.

El régimen de riego deficitario arrojó más eficiencia en el uso del agua; sin embargo, el desempeño de los componentes del rendimiento fue el más bajo.

Conflictos de interés: Los autores declaran que no tienen conflictos de intereses financieros conocidos, ni relaciones personales que pudieran influir en el desarrollo de este artículo. **Financiación:** Esta investigación no recibió ninguna subvención específica de agencias de financiación de los sectores público, comercial o sin fines de lucro. **Contribución de los autores:** Robert Augusto Rodríguez-Restrepo contribuyó a la planificación de la investigación, realizó el experimento, contribuyó al análisis de datos y escribió el manuscrito. Harold Tafur-Hermann, Sanin Ortiz-Grisales y Magda Piedad Valdés-Restrepo contribuyeron a la planificación de la investigación y al análisis de datos.

REFERENCIAS

- AGRONET 2024. Estadísticas agrícolas nacionales. Disponible desde Internet en: www.agronet.gov.co
- ALOMRAN, A.; LUKI, I. 2012. Effects of deficit irrigation on yield and water use of grown cucumbers in Saudi Arabia. WIT Transactions on Ecology and the Environment. 168:353-358. <https://doi.org/10.2495/SI120301>
- ALSAEEDI, A.; EL-RAMADY, H.; ALSHAAL, T.; EL-GARAWANY M.; ELHAWAT, N.; AL-OTAIBI A. 2019. Silica nanoparticles boost growth and productivity of cucumber under water deficit and salinity stresses by balancing nutrients uptake. Plant Physiology and Biochemistry. 139:1-10. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.03.008>
- AMER, K. 2011. Effect of irrigation method and quantity on squash yield and quality, Agricultural Water Management. 98(8):1197-1206. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.03.003>
- BAENA GARCÍA, D.; ORTIZ GRISALES, S.; VALDÉS RESTREPO, M.; ESTRADA SALAZAR, E.; VALLEJO CABRERA, F. 2010. UNAPAL –Abanico 75: Nuevo cultivar de zapallo con alto contenido de materia seca en el fruto para fines agroindustriales. Acta Agronómica. 59(3):285-292.
- ÇAKIR, R.; KANBUROGLU-ÇEBİ, U.; ALTINTAS, S.; OZDEMİR, A. 2017. Irrigation scheduling and water use efficiency of cucumber grown as a spring-summer cycle crop in solar greenhouse. Agricultural Water Management. 180:78-87. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.10.023>
- DING, W.; ZHANG, G.; YI, X.; KANG, J.; ZHANG, J.; LI, G.; ZHANG, J.; CHANG, N.; LI, H. 2023. Improving potential of reactive nitrogen and carbon footprint of intensified greenhouse cucumber-tomato production with optimized drip irrigation with nitrogen reduction strategies. Journal of Cleaner Production. 424:138898. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138898>

- ESTRADA, E.I.; GARCÍA, M.A.; GUTIÉRREZ, A.; CARDOZO, C.I.; SÁNCHEZ, M.S.; BAENA, D.; VALLEJO, F.A. 2004. Cultivo de Zapallo variedad UNAPAL Bolo verde y UNAPAL Mandarino. Segunda Edición. Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira. p.18. Disponible en internet: <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/51962/9588095239.PDF?sequence=2&isAllowed=y>
- ESTRADA SALAZAR, E.; VALLEJO CABRERA, F.; BAENA GARCÍA, D.; ORTIZ GRISALES, S.; ZAMBRANO BLANCO, E. 2010. Unapal-Llanogrande, nuevo cultivar de zapallo adaptado a las condiciones del valle geográfico del río Cauca, Colombia. *Acta Agronómica*. 59(2):135-143.
- FAOSTAT. 2024. Food and agriculture Organization of the United Nations. Disponible desde Internet en: http://faostat3.fao.org/home/index_es.html?locale=es#DOWNLOAD
- HASHEM, F.A.; MEDANY, M.A.; EL-MONIEM, E.M.; ABDALLAH, M.M.F. 2011. Influence of green-house cover on potential evapotranspiration and cucumber water requirements, *Annals of Agricultural Sciences*. 56(1):49-55. <https://doi.org/10.1016/j.aos.2011.05.001>
- INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES-IDEAM. 2020. Consulta y descarga de datos hidrometeorológicos. Disponible desde Internet en: <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>
- LI, H.; YANG, X.; CHEN, H.; CUI, Q.; YUAN, G.; HAN, X.; WEI, C.; ZHANG, Y.; MA, J.; ZHANG, X., 2018. Water requirement characteristics and the optimal irrigation schedule for the growth, yield, and fruit quality of watermelon under plastic film mulching. *Scientia Horticulturae*. 241:74-82. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.06.067>
- MAO, X.; LIU, M.; WANG, X.; LIU, C.; HOU, Z.; SHI, J. 2013. Effects of deficit irrigation on yield and water use of greenhouse grown cucumber in the North China Plain, *Agricultural Water Management*. 61(3):219-228. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(03\)00022-2](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(03)00022-2)
- RAHIL, M.H.; QANADILLO, A. 2015. Effects of different irrigation regimes on yield and water use efficiency of cucumber crop. *Agricultural Water Management*. 148:10-15. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.09.005>
- RODRÍGUEZ, R.R.; VALDÉS, R.M.; ORTIZ, G.S. 2018. Características agronómicas y calidad nutricional de los frutos y semillas de zapallo *Cucurbita* sp. *Revista Colombiana De Ciencia Animal – RECIA*. 10(1):86-97. <https://doi.org/10.24188/recia.v10.n1.2018.636>
- SEYMEN, M.; YAVUZ, D.; DURSUN, A.; SAIT KURTAR, E.; TÜRKMEN, Ö. 2019. Identification of drought-tolerant pumpkin (*Cucurbita pepo* L.) genotypes associated with certain fruit characteristics, seed yield, and quality. *Agricultural Water Management*. 221:150-159. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.05.009>
- TÜRKMEN, Ö.; SEYMEN, M.; FIDAN, S.; PAKSOY, M. 2016. Morphological parameters and selection of Turkish edible seed pumpkins (*Cucurbita pepo* L.) germplasm. *International Journal of Agricultural and Biosystems Engineering*. 10 (5):232-239.
- VISCONTI, F.; SALVADOR, A.; NAVARRO, P.; DE PAZ, J.M. 2019. Effects of three irrigation systems on 'Piel de sapo' melon yield and quality under salinity conditions. *Agricultural Water Management*. 226:105829. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105829>
- WANG, Y.; XIE, Z.; MALHI, S.; VERA, C.; ZHANG, Y. 2014. Gravel-sand mulch thickness effects on soil temperature, evaporation, water use efficiency and yield of watermelon in semi-arid Loess Plateau, China. *Acta Ecologica Sinica*. 34:261-265. <https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2014.05.007>
- YAVUZ, D.; SEYMEN, M.; YAVUZ, N.; ÇOKLAR, H.; ERCAN, M. 2021. Effects of water stress applied at various phenological stages on yield, quality, and water use efficiency of melon. *Agricultural Water Management*. 246:106673. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106673>
- ZHANG, Y.; WU, Z.; SINGH, V.; LIN, Q.; NING, S.; ZHOU, Y.; JIN, J.; ZHOU, R.; MA, Q. 2023. Agricultural drought characteristics in a typical plain region considering irrigation, crop growth, and water demand impacts. *Agricultural Water Management*. 282:108266. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108266>
- ZHANG, W.; LI, Y.; XU, Y.; ZHENG, Y.; LIU, B.; LI, Q. 2023. Alternate drip irrigation with moderate nitrogen fertilization improved photosynthetic performance and fruit quality of cucumber in solar greenhouse. *Scientia Horticulturae*. 308:111579. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111579>

Propiedades físicas de un suelo sometido a la aplicación de diferentes cantidades de materia orgánica de escarabajo

Physical properties of soil submitted to the implementation of different amounts of beetle organic matter

Juan Pablo Fernández-Rodríguez¹ ; Javier Giovanni Álvarez-Herrera^{2*} ; Marilcen Jaime-Guerrero³ 

¹Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Subdirección de Agrología. Bogotá D.C., Colombia; e-mail: juan.fernandez@igac.gov.co

²Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Grupo de Investigaciones Agrícolas (GIA). Tunja - Boyacá, Colombia; e-mail: javier.alvarez@uptc.edu.co

³Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Grupo de Investigaciones Agrícolas (GIA). Tunja - Boyacá, Colombia, e-mail: marilcen.jaime@uptc.edu.co

*autor de correspondencia: javier.alvarez@uptc.edu.co

Cómo citar: Fernández-Rodríguez, J.P.; Álvarez-Herrera, J.G.; Jaime-Guerrero, M. 2024. Propiedades físicas de un suelo sometido a la aplicación de diferentes cantidades de materia orgánica de escarabajo. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 27(2):e2561. <http://doi.org/10.31910/rudca.v27.n2.2024.2561>

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 8 de 2023

Aceptado: septiembre 2 de 2024

Editado por: Helber Adrián Arévalo Maldonado

RESUMEN

Las áreas con suelos degradados en el mundo son cada vez mayores y ponen en peligro la seguridad alimentaria, los ecosistemas y la sostenibilidad; no obstante, una herramienta para controlar esta pérdida de suelo es la adición de materia orgánica (MO). Existen diversas fuentes de materia orgánica, una de ellas, proviene del abono orgánico de escarabajo, pero se desconoce su efecto sobre las propiedades físicas del suelo. Este trabajo evaluó el impacto de la aplicación de diferentes cantidades de materia orgánica de escarabajo en las propiedades físicas de un suelo. Se utilizó un diseño experimental completamente aleatorizado con cinco tratamientos correspondientes a diferentes dosis de materia orgánica de escarabajo (0, 4, 8, 12 y 16 t ha⁻¹), aplicada al suelo. La materia orgánica se aplicó y se dejó actuar durante 70 días; al cabo de este tiempo se midieron las propiedades físicas del suelo. Los resultados indicaron que la materia orgánica de escarabajo afectó significativamente la densidad aparente, el índice de estabilidad de agregados (IEA), la resistencia a la penetración y la humedad volumétrica. Los mayores valores de IEA se obtuvieron con la aplicación de 4 t ha⁻¹ de MO. La adición de 16 t ha⁻¹ de MO disminuyó, tanto la densidad aparente como la resistencia a la penetración y mejoró la calidad del suelo en parámetros, como el índice de plasticidad y la humedad volumétrica. La materia orgánica de escarabajo se convierte en una alternativa importante para mejorar las propiedades físicas del suelo.

Palabras clave: Enmienda; Estabilidad de agregados; Índice de plasticidad; Resistencia a la penetración; Retención de humedad.

ABSTRACT

The degradation of soils worldwide is escalating, posing threats to food security, ecosystems, and sustainability. However, one tool to mitigate this soil degradation is the addition of organic matter (OM). Various sources of organic matter exist, one being beetle organic fertilizer; nevertheless, its impact on soil physical properties remains unknown. This study aimed to assess the effects of different quantities of beetle organic matter application on soil physical properties. A completely randomized experimental design was employed with five treatments corresponding to varying doses of beetle organic matter (0, 4, 8, 12, and 16 t ha⁻¹) applied to the soil. The organic matter was applied and allowed to interact with the soil for 70 days. Subsequently, the soil's physical properties were measured. The findings revealed that beetle organic matter significantly influenced bulk density, aggregate stability index (ASI), penetration resistance, and volumetric moisture. The highest ASI values were observed by applying 4 t ha⁻¹ of OM. Applying 16 t ha⁻¹ of OM reduced apparent density and penetration resistance while enhancing soil quality in parameters such as plasticity index and volumetric moisture. Beetle organic matter emerges as a promising alternative for improving soil physical properties.

Keywords: Aggregate stability; Amendment; Moisture retention; Penetration resistance; Soil plasticity index.

INTRODUCCIÓN

El aumento en la actividad antropogénica en los suelos se ha incrementado, con el fin de garantizar la seguridad alimentaria y proporcionar servicios ecosistémicos (Wang *et al.* 2024). Actualmente, se estima que cerca del 40 % de la superficie terrestre tiene suelos degradados y presenta una tendencia en alza, que amenaza directamente el bienestar ambiental, de casi la mitad de la población mundial (UNCCD, 2022). Asimismo, el cambio climático se presenta como un factor clave en la pérdida de suelo y se espera que esta tendencia se intensifique en las próximas décadas, debido a la creciente incidencia de precipitaciones extremas, especialmente, en las zonas de clima tropical; además, las zonas con latitudes templadas y climas subtropicales no están exentas de los efectos del aumento de la erosión climática y podrían experimentar picos de incrementos en la pérdida de suelo, de hasta el 50 % (Borrelli *et al.* 2020).

En este sentido, la intensificación de la producción agrícola y el incremento del rendimiento por unidad de superficie ha contribuido a la degradación de los suelos, afectando su estructura y disminuyendo su fertilidad (Oliveira *et al.* 2019). Este fenómeno resulta de la pérdida de materia orgánica (MO), la aplicación excesiva e intensiva de fertilizantes, la acidificación, la salinidad, la emisión de gases de efecto invernadero, la erosión, la compactación, la contaminación y la pérdida de biodiversidad (Kopittke *et al.* 2019). Tales factores afectan las propiedades físicas del suelo, limitan el desarrollo de las raíces, reducen la disponibilidad de nutrientes y disminuyen el rendimiento de los cultivos. Además, las áreas degradadas son más susceptibles a enfermedades, sequías e inundaciones y problemas de manejo del suelo (UNCCD, 2022).

La MO determina, en gran medida, la calidad y la fertilidad del suelo (Gerke, 2022) y contribuye a mejorar diferentes propiedades, ya que aumenta la capacidad de intercambio catiónico, el contenido de humedad, favorece los procesos de infiltración y aumenta la fertilidad potencial del suelo en cuanto a la capacidad de retener nutrientes, principalmente, N, P y S (Kopittke *et al.* 2019), puesto que disminuye la pérdida de suelo, lo cual, es importante para mantener la fertilidad y la productividad (Timsina, 2018). En este sentido, la degradación de las propiedades físicas está estrechamente relacionada con la reducción del contenido de MO, por lo tanto, la adición de enmiendas orgánicas toma gran importancia, ya que mejoran las propiedades físicas del suelo e incrementan la estabilidad estructural, la porosidad, la resistencia a la compactación, disminuyen la densidad aparente y mejoran la diversidad microbiana del suelo (Kuzyakov *et al.* 2020).

Al respecto, Blanco-Canqui (2024) mencionan que la MO tiene el potencial de mejorar algunas propiedades hidráulicas y estructurales del suelo y que la acumulación de C orgánico constituye el principal mecanismo para mejorar estos parámetros. Asimismo, es sabido del efecto de la aplicación de materia orgánica sobre la formación de agregados y la estabilidad del suelo (Li *et al.* 2023). Según Halder *et al.* (2022) mencionan que la dinámica de los agregados del suelo afecta el secuestro de carbono orgánico de los suelos, el ciclo de

los nutrientes, la difusión de aire y agua en el suelo y que está directamente relacionada con la calidad de la materia orgánica y su grado de descomposición.

Una alternativa novedosa es el uso de materia orgánica procesada por escarabajos; sin embargo, se desconocen sus efectos sobre la mejora de las propiedades físicas del suelo. En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo analizar el efecto de diferentes cantidades de materia orgánica de escarabajos en las propiedades físicas de un suelo, en la Sabana de Bogotá.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento, se llevó a cabo en las instalaciones de la Universidad Nacional de Colombia-Bogotá, ubicada a una altura de 2.556 m s.n.m., con una temperatura promedio de 14,7 °C, humedad relativa del 80 % y brillo solar de 4,5 h d⁻¹.

Se utilizó un diseño experimental completamente aleatorizado, con cinco tratamientos, que correspondieron a cinco dosis de materia orgánica 0, 4, 8, 12 y 16 t ha⁻¹, con seis repeticiones, para un total de 30 unidades experimentales (UE). Cada UE estuvo compuesta por una parcela de 1 m², ubicada en un terreno plano y a campo abierto; además, el ensayo general tuvo un metro alrededor de condición de borde y deshierbado, con el fin de evitar la incidencia de material vegetal y alteración de los tratamientos.

La materia orgánica correspondió al producto abono orgánico de escarabajos con registro ICA 5201 de Tierra viva escarabajos (Colombia). El abono orgánico de escarabajos es obtenido a partir de la descomposición de residuos orgánicos durante cuatro meses, generada por la actividad de las larvas de los escarabajos (Tabla 1). La materia orgánica fue adicionada a la superficie del suelo, el cual, había sido previamente preparado mediante labranza tradicional, con un pase de rastra y un pase de rastrillo, con una profundidad de 20 cm. Este suelo se caracteriza por tener textura franca, con altos valores de materia orgánica (6,7 %), contenidos de humedad volumétricos que oscilan entre 42 y 63 % y pH de 5,7, capacidad de intercambio catiónica efectiva de 17,5 cmol kg⁻¹, N de 0,45 % y con Ca, K y Mg, de 14,8, 0,79 y 1,26 cmol kg⁻¹ (Herrera *et al.* 2012).

Se aplicó riego cada seis días, con el fin de mantener el suelo a capacidad de campo, para favorecer los procesos microbiológicos. La materia orgánica se dejó actuar durante 70 días y al cabo de este tiempo, se extrajeron muestras de suelo, a una profundidad entre 10 y 20 cm, secadas al aire y llevadas al laboratorio, en donde se determinaron las siguientes propiedades físicas: densidad aparente, índice de estabilidad de agregados, resistencia a la penetración, índice de plasticidad y humedad volumétrica.

La densidad aparente (ρ_b) se determinó por el método del terrón parafinado, mientras que la resistencia a la penetración (RP) se midió mediante la utilización de un penetrómetro cónico digital Fieldscout SC 900 (Spectrum Technologies, Aurora, IL), tomando el promedio de las mediciones de RP a 10 y 20 cm. Para la

determinación del diámetro ponderado medio (DPM), se empleó la ecuación 1, mientras que para el cálculo del índice de estabilidad de agregados (IEA), se empleó la ecuación 2. Luego se colocó la muestra de suelo en oscilación en una serie de tamices de 6,35, 4, 2, 1 y 0,5 mm de diámetro, según lo descrito por Kemper & Rosenau (1986); transcurrido 30 minutos, las porciones retenidas en cada tamiz fueron trasladadas a cápsulas de aluminio y se secaron a 105 °C, durante un período de 24 horas, para su posterior pesaje, siguiendo la metodología adaptada de Ćirić *et al.* (2012).

$$DPM = \sum_{i=1}^n \overline{X_i} \times W_i$$

ecuación 1

Donde, $\overline{X_i}$: diámetro promedio de los agregados depositados en cada tamiz; W_i : porcentaje de masa de la respectiva fracción de agregados.

$$IEA = \frac{W_2 + W_3 + W_4 + W_n}{W_1 + W_n}$$

ecuación 2

W_1 : porcentaje de masa de agregados mayores a 2 mm

W_n : porcentaje de masa de agregados menores a 0,25 mm

$W_2, W_3, W_4, \dots$: porcentaje de masa de agregados en cada uno de los tamices, que se encuentran dentro del rango de 2 a 0,25 mm de diámetro.

Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas del abono orgánico de escarabajos con registro ICA 5201.

Propiedades fisicoquímicas	Valor	Unidades
pH	7,74	%
Da	0,55	g cm ⁻³
Humedad	25	%
CE	19,05	cmol kg ⁻¹ de suelo
Retención de humedad	140	%
CIC	50	%
Relación C/N	10	
Carbono orgánico oxidable	21	%
N	2	%
P	1,7	%
K	1,6	%
Ca	7,5	%
Mg	0,5	%
S	0,5	%
B	0,19	mg L ⁻¹
Cu	17	mg L ⁻¹
Mn	74	mg L ⁻¹
Fe	2550	mg L ⁻¹
Zn	92	mg L ⁻¹
Na	4313	mg L ⁻¹
Cenizas	33,1	%

Adicionalmente, se establecieron los límites de Atterberg para obtener el índice de plasticidad (IP) (límite líquido menos el límite plástico), para lo cual, se tomaron 120 g de muestra de suelo, que se pasó a través de un tamiz UNE 400 y luego se mezcló con agua destilada, para formar una pasta uniforme, que se depositó en la cazuela casagrande S020604 (Pinzuar S.A.S, Colombia), en donde se tomó el contenido de humedad del suelo a los 25 golpes, para determinar el límite líquido, mientras que el límite plástico, se calculó tomando la humedad del suelo cuando una muestra de 8 g se rodó entre los dedos y una placa de cristal, para formar un hilo de 3 mm de diámetro, hasta que el hilo elaborado se desmoronaba en tres partes. La humedad volumétrica (θ_v), expresada en porcentaje,

se determinó mediante la ecuación 3, en donde se calculó la diferencia entre la masa de suelo húmedo (M_{sh}) y la masa de suelo seco (M_{ss}) y se dividió por el volumen total de la muestra (V_T) y la densidad del agua (ρ_w).

$$\theta_v = \frac{(M_{sh} - M_{ss})}{V_T \times \rho_w}$$

ecuación 3

Con los datos obtenidos se realizó un análisis de varianza convencional, además de una prueba de comparación de promedios de Tukey al 5 %, análisis de contrastes ortogonales y correlaciones de Pearson. Para el análisis de los datos se empleó el software estadístico SAS v. 9.1 (Cary, N.C.).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Densidad Aparente (pb). La densidad aparente disminuyó de forma lineal y significativa con el incremento del contenido de materia orgánica ($P \leq 0,01$), de tal manera, que la menor densidad ($0,91 \text{ g cm}^{-3}$) se obtuvo con la aplicación de 16 t ha^{-1} (Figura 1); esto indica, que la aplicación de materia orgánica de escarabajo logró modificar la densidad aparente del suelo, corroborado con el análisis

de contrastes ortogonales (Tabla 3). Lo anterior concuerda con lo reportado por Malone *et al.* (2023), quienes en un metaanálisis encontraron que, en 21 estudios, la adición de materia orgánica proveniente de diferentes enmiendas logró disminuir la densidad aparente de $1,5$ a $1,2 \text{ g cm}^{-3}$; asimismo, estos autores mencionan que los materiales compostados son los que tienen un mayor efecto en la reducción de la pb.

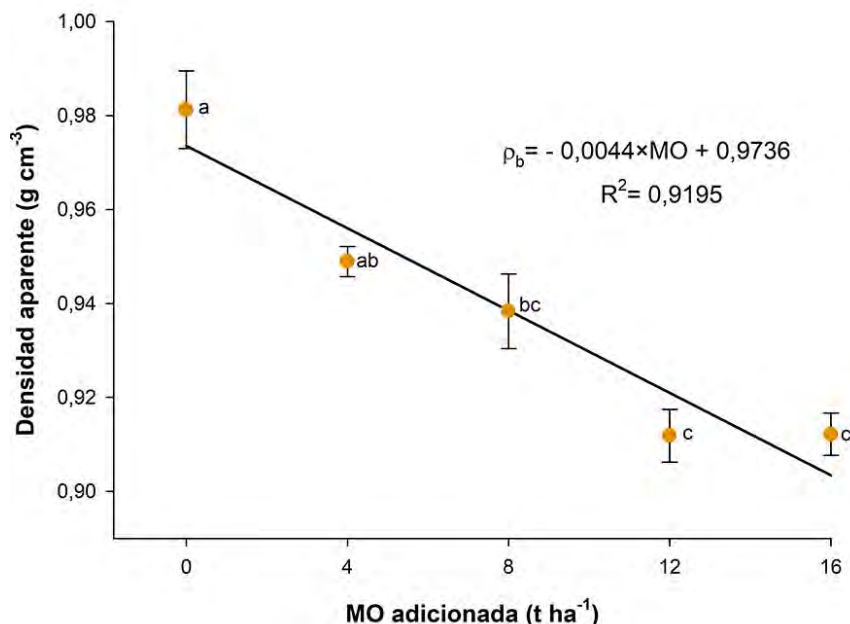


Figura 1. Densidad aparente (pb) de un suelo sometido a la aplicación de diferentes dosis de materia orgánica (MO), a partir de un abono orgánico de escarabajo. Letras distintas indican diferencias estadísticas entre tratamientos, según la prueba de Tukey ($P \leq 0,05$). Barras de error indican el error estándar ($n=6$).

La menor densidad aparente obtenida es resultado de una mayor macroporosidad, que se genera, debido a que el aporte de materia orgánica mejora la estructura del suelo, ya que la MO actúa como un agente que facilita la formación de agregados lo que aumenta el tamaño de estos; esto, a su vez, permite un mayor espacio entre partículas y reduce los valores de densidad (Athira *et al.* 2019). Del mismo modo, Reichert *et al.* (2018) mencionan que las aplicaciones de MO aumentan el número de puntos de contacto y del tamaño de los agregados del suelo, lo cual, reorganiza las partículas y reduce la densidad aparente, pero aumenta la resistencia a la penetración del suelo. Similarmente, Forero *et al.* (2010) encontraron que con la adición de cachaza (subproducto obtenido del proceso de elaboración de panela) en un inceptisol, a mayores cantidades de materia orgánica adicionadas, mayor fue la porosidad total y menor la densidad aparente.

Estabilidad de agregados. El DPM no tuvo diferencias estadísticas significativas con la aplicación de las diferentes dosis de MO. El DPM tuvo un promedio de $2,38 \text{ mm}$. Del mismo modo, al comparar el efecto de los tratamientos para estos parámetros mediante los contrastes ortogonales, se encontró que la aplicación versus la no aplicación de materia orgánica no obtuvo diferencias estadísticas (Tabla 3). En contraste, Sonsri & Watanabe (2023) reportan que el DPM se incrementó con la aplicación de diferentes fuentes de materia orgánica, compost de residuos de café, de

lodos y de aceite de canola; asimismo, reportan que el DPM correlacionó positivamente con el contenido de carbono orgánico y con la fracción orgánica de alto peso molecular, atribuido a un alto contenido de polisacáridos presentes en la MO. Estos valores de DPM son similares a los obtenidos por Visconti-Moreno & Valenzuela-Balcázar (2019), que oscilaron entre $1,85$ y $2,92$, para suelos del trópico de clima cálido o frío, respectivamente.

En cuanto al IEA, mostró diferencias estadísticas significativas y se ajustó a un polinomio de segundo grado, donde el mayor IEA se obtuvo con la aplicación de 4 t ha^{-1} y el menor con el testigo (Figura 2); asimismo, la comparación por contrastes ortogonales también mostró significancia, lo que resalta los beneficios de la aplicación de materia orgánica de escarabajo sobre el andisol evaluado. Lo anterior es similar a lo mencionado por Iheshiulo *et al.* (2024), quienes obtuvieron que la adición de enmiendas orgánicas mejora los atributos de calidad del suelo, incluida la estabilidad de agregados. Al respecto, se puede decir que la dosis de 4 t ha^{-1} estabiliza los agregados de manera más eficiente y favorece la formación de sustancias ligantes, como el humus; no obstante, cuando se aplican cantidades mayores es probable que altas dosis de MO conlleven a un incremento de la actividad microbiana, lo cual puede llevar a una rápida descomposición de la MO en lugar de tener un efecto en la estabilización en el suelo (Cabugao *et al.* 2022).

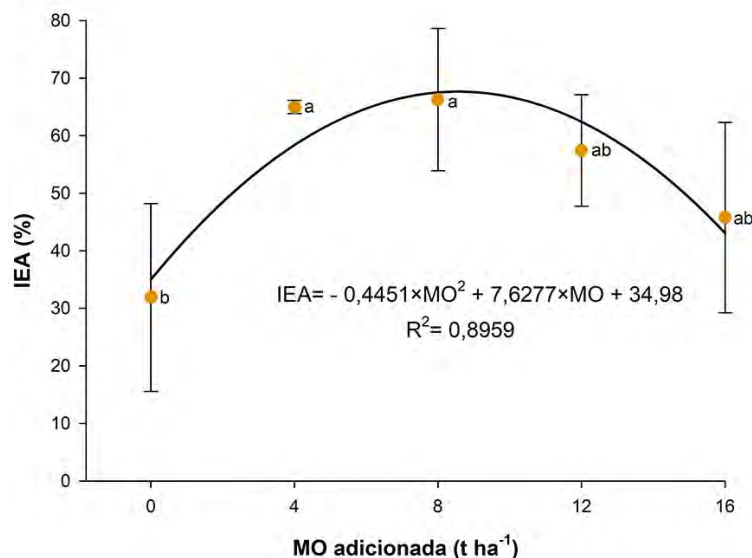


Figura 2. Índice de estabilidad de agregados (IEA) de un suelo sometido a la aplicación de diferentes dosis de materia orgánica (MO), a partir de un abono orgánico de escarabajo. Letras distintas indican diferencias estadísticas entre tratamientos, según la prueba de Tukey ($P \leq 0,05$). Barras de error indican el error estándar ($n=6$).

Del mismo modo, Sonsri & Watanabe (2023) encontraron que la adición de materia orgánica incrementó la cantidad de agregados con un tamaño mayor a 2 mm. Al respecto, Halder *et al.* (2021) afirman que el estado de descomposición de los materiales orgánicos adicionados afecta, en gran medida, el resultado que logre la aplicación de MO sobre los agregados del suelo; de igual manera, si los residuos son de fácil descomposición (con azúcares solubles abundantes), los agregados del suelos tendrán una mejora considerable en tamaño, a corto plazo y su efecto se atenuará con el tiempo, mientras que la adición de materiales de lenta descomposición (con O-alquilo y di-O-Alquilo C abundantes), tendrán un efecto a largo plazo, en la estabilidad de los agregados; asimismo, Liu *et al.* (2021) mencionan que la estabilidad de los agregados está relacionada con la dinámica de formación de agregados de gran tamaño.

Al respecto, Iheshiulo *et al.* (2024) afirman que la estabilidad de agregados del suelo es fundamental para mejorar la función del suelo y el rendimiento de los cultivos y que este parámetro depende de agentes bióticos que aumentan el grado de agregación de las partículas del suelo, como la macrofauna (lombrices), la mesofauna (colémbolos, quilópodos, diplópodos), la microfauna (nemátodos) y la microflora (bacterias y hongos) y las raíces y de agentes abióticos, como la fracción de arcilla, los óxidos de hierro, los carbonatos de calcio y la materia orgánica (Even & Cotrufo, 2024). Igualmente, Halder *et al.* (2022) encontraron que la MO desempeña una función importante en la formación y en la agregación de las partículas del suelo, así como en la disminución de la pérdida de suelo, ya que contribuye a formar puentes entre polímeros orgánicos con las superficies inorgánicas. Estos polímeros, incluyen sustancias, como polisacáridos y proteínas, que actúan como agentes aglutinantes, que ayudan a unir las partículas del suelo en agregados más grandes y estables. Lo anterior, explicaría la respuesta obtenida en la estabilidad estructural del suelo con la adición de abono de escarabajo; sin embargo, la baja respuesta en los diámetros de los

agregados se debe, posiblemente, al poco tiempo, en el que se dejó actuar este material orgánico sobre las partículas de suelo, por lo que se recomienda evaluar tiempos mayores, para poder establecer el verdadero efecto del abono de escarabajo sobre la formación de agregados en el suelo.

Índice de plasticidad (IP). Se encontraron diferencias estadísticas significativas entre tratamientos para el IP; sin embargo, no hubo una tendencia clara del efecto de la materia orgánica, por lo que la prueba de contrastes ortogonales no mostró diferencias estadísticas (Tabla 3); a pesar de esto, con las dosis de 4 t ha⁻¹ y 8 t ha⁻¹, se obtuvo el mayor y el menor índice de plasticidad, respectivamente (Figura 3a). Se esperaba encontrar una mayor respuesta con dosis mayores; no obstante, la concentración de bases encontrada en la materia orgánica de escarabajo (Tabla 1) podría haber afectado negativamente su efecto. Al respecto, Yong *et al.* (2019) afirman que bases, como el Calcio y el Magnesio, tienden a promover la floculación de las partículas de suelo, que contribuyen a la formación de agregados estables, reduciendo la plasticidad del suelo, ya que un suelo con buenos agregados es menos susceptible a deformarse cuando está húmedo.

En este sentido, es sabido que el IP está más relacionado con la textura y es así como éste suelo, por ser de textura Franca, tiene un IP que no fluctúa con facilidad al agregar materia orgánica. Este índice determina el rango de humedad en el que el suelo es plástico y tiene los mayores riesgos para manipular con equipos de labranza o cultivos, por los posibles efectos de compactación y de sellado de la superficie. Aun así, Gui *et al.* (2021) mencionan que, conforme se incrementa el contenido de MO en el suelo aumenta el IP y mencionan que si el contenido de carbón orgánico en el suelo es mayor al 7,5 %, el IP puede aumentar hasta en un 5,2 %, atribuido a que, si se incrementa la MO aumentan los contenidos de humus, que es una sustancia coloidal hidrófila, por lo que aumentará el contenido de humedad en el suelo, que afecta positivamente los valores de los límites de Atterberg.

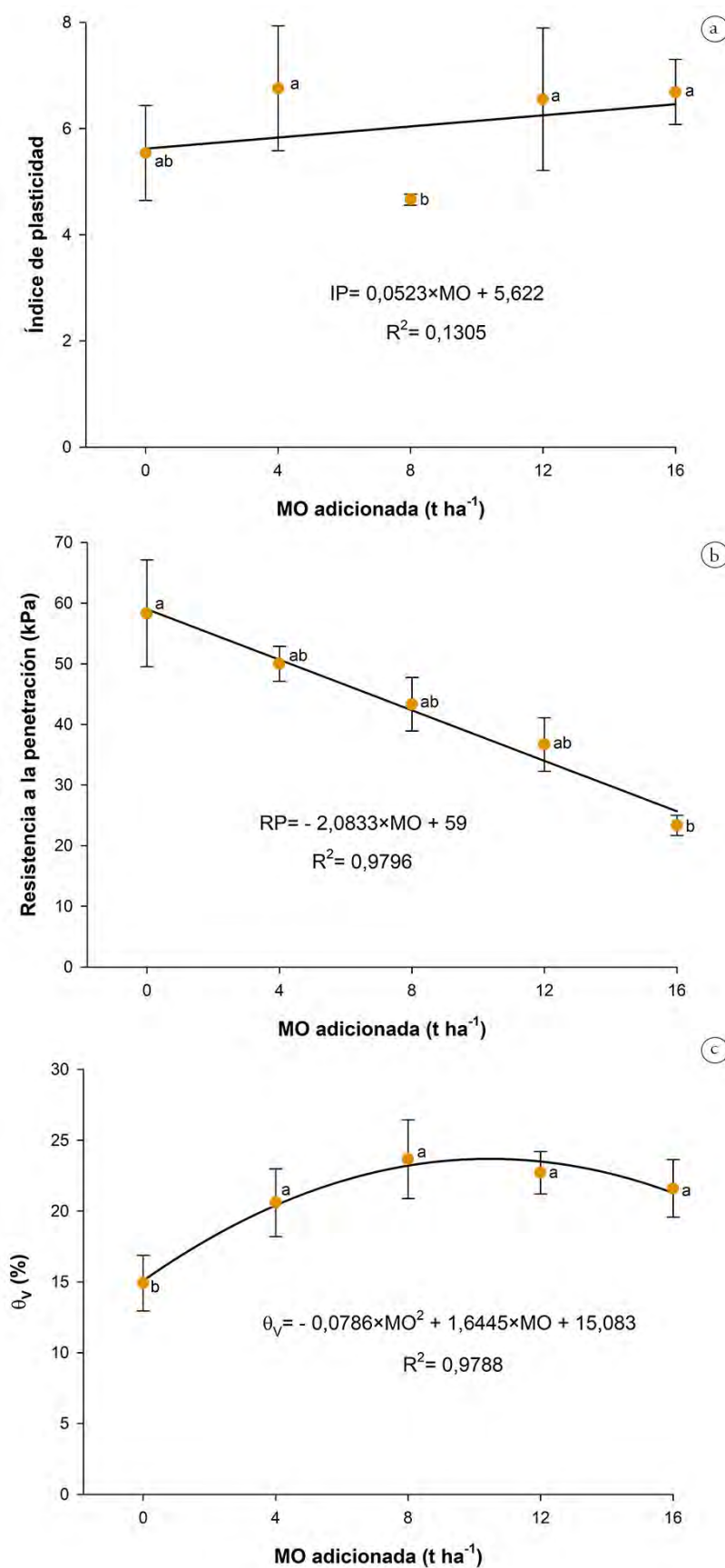


Figura 3. a) Índice de plasticidad, b) Resistencia a la penetración y c) Humedad volumétrica (θ_v) de un suelo sometido a la aplicación de diferentes dosis de materia orgánica (MO), a partir de un abono orgánico de escarabajo. Letras distintas indican diferencias estadísticas entre tratamientos, según la prueba de Tukey ($P \leq 0,05$). Barras de error indican el error estándar ($n=6$).

Resistencia a la penetración (RP). Se presentaron diferencias significativas entre las distintas cantidades de MO aplicadas al suelo. Del mismo modo, la resistencia a la penetración se hizo menor, conforme el contenido de materia orgánica aumentó, de tal modo, que la aplicación de 16 t ha⁻¹ generó la menor resistencia con 0,23 kg cm⁻² (Figura 3b). Asimismo, los contrastes ortogonales indicaron que la aplicación de materia orgánica de escarabajo afectó significativamente la resistencia a la penetración con relación a la no aplicación (Tabla 3). Además, la RP tuvo una correlación positiva y significativa con la densidad aparente (Tabla 2), de tal forma

que, con la adición de materia orgánica de escarabajo, disminuye la RP, debido a que también disminuye la densidad aparente del suelo, lo cual, está estrechamente relacionado con la compactación (Sanches Suzuki *et al.* 2022) y la porosidad del suelo. Al respecto, la compactación del suelo tiene fuertes implicaciones en el manejo del suelo, ya que reduce la velocidad de infiltración y drenaje del agua, disminuye la disponibilidad de agua y oxígeno para las raíces (Shaheb *et al.* 2021), por lo anterior, se considera una práctica favorable la adición de abono de escarabajo al suelo.

Tabla 2. Prueba de correlaciones de Pearson entre propiedades físicas de un suelo bajo la aplicación de diferentes dosis de materia orgánica, a partir de un abono orgánico de escarabajo.

Variable	ρ _b	DPM	IEA	IP	RP	θ _v
ρ _b	1	-0,09 ns	-0,09 ns	-0,3 ns	0,62 *	-0,6 *
DPM		1	-0,6 *	-0,1 ns	0,2 ns	-0,7 *
IEA			1	0,1 ns	-0,3 ns	0,7 *
IP				1	-0,3 ns	-0,03 ns
RP					1	-0,4 ns
θ _v						1

* Diferencias estadísticas al 5 %, ns: no hay diferencias estadísticas. ρ_b: Densidad aparente; DPM: diámetro medio ponderado; IEA: índice de estabilidad de agregados; IP: índice de plasticidad; RP: resistencia a la penetración; θ_v: humedad volumétrica.

Tabla 3. Contrastes ortogonales para propiedades físicas del suelo entre la no aplicación y aplicación de materia orgánica, a partir de un abono orgánico de escarabajo.

Variable	Significancia
Densidad aparente	**
Diámetro medio ponderado (DPM)	ns
Índice de estabilidad	*
Índice de plasticidad	ns
Resistencia a la penetración	*
Humedad Volumétrica	**

** Diferencias estadísticas al 1 %, ** diferencias estadísticas al 5 %, ns: no hay diferencias estadísticas.

Humedad volumétrica (θ_v). Las diferentes dosis de materia orgánica aplicadas afectaron de manera significativa el comportamiento de la humedad volumétrica en el suelo, ajustado a un polinomio de segundo grado, que indica que la mayor humedad volumétrica se encontró con el tratamiento de 8 t ha⁻¹ (Figura 3c); no obstante, independientemente de la dosis, la aplicación de materia orgánica de escarabajo generó mayor contenido de humedad volumétrico (Tabla 3). En este sentido, la adición de materia orgánica al suelo es importante, ya que aumenta la estabilidad estructural, debido al aumento del tamaño de los agregados (Sonsri & Watanabe, 2023), de la misma forma, mejora la disponibilidad de agua en el suelo, las tasas de infiltración de agua y la conductividad hidráulica (Jia *et al.* 2024). En este orden de ideas, posiblemente, la materia orgánica de escarabajo estaría favoreciendo no solo la retención, sino, también, la forma como se mueve el agua en el suelo.

estudiado, con excepción del diámetro medio ponderado de los agregados. La aplicación de 12 y 16 t ha⁻¹ lograron disminuir la densidad aparente y resistencia a la penetración e incrementaron el índice de plasticidad, la humedad volumétrica y el índice de estabilidad de agregados, por lo tanto, la materia orgánica de escarabajo se puede considerar potencialmente como una enmienda para mejorar las propiedades físicas y la calidad de los suelos.

Conflicto de interés: El artículo se redactó y se revisó por parte de todos los autores, quienes manifiestan no tener conflicto de interés que ponga en duda la veracidad y validez de los resultados. **Contribución de los autores:** Juan Pablo Fernández: conceptualización, metodología, investigación, escritura borrador original. Javier G. Álvarez-Herrera: escritura, análisis formal, escritura-revisión, edición y supervisión. Marilcen Jaime-Guerrero: escritura, depuración de datos, escritura-revisión y edición.

Como conclusión se puede indicar que la aplicación de materia orgánica de escarabajo mejoró las propiedades físicas del suelo

REFERENCIAS

- ATHIRA, M.; JAGADEESWARAN, R.; KUMARAPERUMAL, R. 2019. Influence of soil organic matter on bulk density in Coimbatore soils. *International Journal of Chemical Studies*. 7(3):3520-3523.
- BLANCO-CANQUI, H. 2024. Do cover crop mixtures improve soil physical health more than monocultures? *Plant and Soil*. 495(1):99-112. <https://doi.org/10.1007/s11104-023-06086-4>
- BORRELLI, P.; ROBINSON, D.A.; PANAGOS, P.; LUGATO, E.; YANG, J.E.; ALEWELL, C.; WUEPPER, D.; MONTANARELLA, L.; BALLABIO, C. 2020. Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015-2070). *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 117(36):21994-22001. <https://doi.org/10.1073/pnas.2001403117>
- CABUGAO, K.G.M.; GUSHGARI-DOYLE, S.; CHACON, S.S.; WU, X.; BHATTACHARYYA, A.; BOUSKILL, N.; CHAKRABORTY, R. 2022. Characterizing natural organic matter transformations by microbial communities in terrestrial subsurface ecosystems: a critical review of analytical techniques and challenges. *Frontiers in Microbiology*. 13:864895. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.864895>
- ĆIRIĆ, V.; MANOJLOVIC, M.; NESIC, L.; BELIC, M. 2012. Soil dry aggregate size distribution: effects of soil type and land use. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 12(4):689-703. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162012005000025>
- EVEN, R.J.; COTRUFO, M.F. 2024. The ability of soils to aggregate, more than the state of aggregation, promotes protected soil organic matter formation. *Geoderma*. 442:116760. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116760>
- FORERO, F.E.; FERNÁNDEZ, J.P.; ALVAREZ-HERRERA, J.G. 2010. Efecto de diferentes dosis de cachaza en el cultivo de maíz (*Zea mays*). *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*. 13(1):77-86. <https://doi.org/10.31910/rudca.v13.n1.2010.711>
- GERKE, J. 2022. The central role of soil organic matter in soil fertility and carbon storage. *Soil Systems*. 6(2):33. <https://doi.org/10.3390/soilsystems6020033>
- GUI, Y.; ZHANG, Q.; QIN, X.; WANG, J. 2021. Influence of organic matter content on engineering properties of clays. *Advances in Civil Engineering*. 2021:6654121. <https://doi.org/10.1155/2021/6654121>
- HALDER, M.; LIU, S.; ZHANG, Z.B.; GUO, Z.C.; PENG, X.H. 2021. Effects of residue stoichiometric, biochemical and C functional features on soil aggregation during decomposition of eleven organic residues. *Catena*. 202:105288. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105288>
- HALDER, M.; LIU, S.; ZHANG, Z.B.; GUO, Z.C.; PENG, X.H. 2022. Effects of organic matter characteristics on soil aggregate turnover using rare earth oxides as tracers in a red clay soil. *Geoderma*. 421:115908. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.115908>
- HERRERA, A.M.; FISCHER, G.; CHACÓN, M.I. 2012. Agronomical evaluation of cape gooseberries (*Physalis peruviana* L.) from central and north-eastern Colombia. *Agronomía Colombiana*. 30(1):15-24.
- IHESHIULO, E.M.A.; LARNEY, F.J.; HERNÁNDEZ-RAMIREZ, G.; LUCE, M.S.; CHAU, H.W.; LIU, K. 2024. Soil organic matter and aggregate stability dynamics under major no-till crop rotations on the Canadian prairies. *Geoderma*. 442:116777. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.116777>
- JIA, Z.; WENG, B.; YAN, D.; PENG, H.; DONG, Z. 2024. The effects of different factors on soil water infiltration properties in High Mountain Asia: A meta-analysis. *Catena*. 234:107583. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107583>
- KEMPER, W.D.; ROSENAU, R.C. 1986. Aggregate stability and size distribution. En: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Methods*. Agronomy Monograph No. 9. American Society of Agronomy-Soil Science Society of America. Madison, WI. p.425-442. <https://eprints.nwsl.ars.usda.gov/id/eprint/732/3/585.pdf>
- KOPITTKE, P.M.; MENZIES, N.W.; WANG, P.; MCKENNA, B.A.; LOMBI, E. 2019. Soil and the intensification of agriculture for global food security. *Environment International*. 132:105078. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105078>
- KUZYAKOV, Y.; GUNINA, A.; ZAMANIAN, K.; TIAN, J.; LUO, Y.; XU, X.; YUDINA, A.; APONTE, H.; ALHARBI, H.; OVSEPYAN, L.; KURGANOVA, I.; GE, T.; GUILLAUME, T. 2020. New approaches for evaluation of soil health, sensitivity and resistance to degradation. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*. 7(3):282-288. <https://doi.org/10.15302/J-FASE-2020338>
- LI, S.; WANG, B.; ZHANG, X.; WANG, H.; YI, Y.; HUANG, X.; GAO, X.; ZHU, P.; HAN, W. 2023. Soil particle aggregation and aggregate stability associated with ion specificity and organic matter content. *Geoderma*. 429:116285. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116285>
- LIU, S.; GUO, Z.C.; HALDER, M.; ZHANG, H.X.; SIX, J.; PENG, X.H. 2021. Impacts of residue quality and soil texture on soil aggregation pathways by using

- rare earth oxides as tracers. *Geoderma*. 399:115114. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115114>
- MALONE, Z.; BERHE, A.A.; RYALS, R. 2023. Impacts of organic matter amendments on urban soil carbon and soil quality: A meta-analysis. *Journal of Cleaner Production*. 419:138148. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138148>
- OLIVEIRA, F.C.C.; FERREIRA, G.W.D.; SOUZA, J.L.S.; VIEIRA, M.E.O.; PEDROTTI, A. 2019. Soil physical properties and soil organic carbon content in northeast Brazil: long-term tillage systems effects. *Scientia Agricola*. 77(4):e20180166. <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2018-0166>
- REICHERT, J.M.; MENTGES, M.I.; RODRIGUES, M.F.; CAVALLI, J.P.; AWE, G.O.; MENTGES, L.R. 2018. Compressibility and elasticity of subtropical no-till soils varying in granulometry organic matter, bulk density and moisture. *Catena*. 165:345-357. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.02.014>
- SANCHES SUZUKI, L.E.A.; REINERT, D.J.; TORRES FENNER, P.; SECCO, D.; REICHERT, J.M. 2022. Prevention of additional compaction in eucalyptus and pasture land uses, considering soil moisture and bulk density. *Journal of South American Earth Sciences*. 120:104113. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.104113>
- SHAHEB, M.R.; VENKATESH, R.; SHEARER, S.A. 2021. A review on the effect of soil compaction and its management for sustainable crop production. *Journal of Biosystems Engineering*. 46:417-439. <https://doi.org/10.1007/s42853-021-00117-7>
- SONSRI, K.; WATANABE, A. 2023. Insights into the formation and stability of soil aggregates in relation to the structural properties of dissolved organic matter from various organic amendments. *Soil and Tillage Research*. 232:105774. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105774>
- TIMSINA, J. 2018. Can organic sources of nutrients increase crop yields to meet global food demand? *Agronomy*. 8(10):214. <https://doi.org/10.3390/agronomy8100214>
- UNITED NATIONS CONVENTION TO COMBAT DESERTIFICATION, UNCCD. 2022. Global land outlook. Second edition. Land Restoration for Recovery and Resilience. United Nations Convention to Combat Desertification. 176p. Disponible desde Internet en: https://www.unccd.int/sites/default/files/2022-04/UNCCD_GLO2_low-res_2.pdf
- VISCONTI-MORENO, E.F.; VALENZUELA-BALCÁZAR, I.G. 2019. Impact of soil use on aggregate stability and its relationship with soil organic carbon at two different altitudes in the Colombian Andes. *Agronomía Colombiana*. 37(3):263-273. <https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v37n3.77601>
- WANG, L.; LU, P.; FENG, S.; HAMEL, C.; SUN, D.; SIDDIQUE, K.H.; GAN, G.Y. 2024. Strategies to improve soil health by optimizing the plant-soil-microbe-anthropogenic activity nexus. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 359:108750. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108750>
- YONG, L.L.; NAMAL JAYASANKA PERERA, S.V.A. D.; SYAMSIR, A.; EMMANUEL, E.; PAUL, S.C.; ANGGRAINI, V. 2019. Stabilization of a residual soil using calcium and magnesium hydroxide nanoparticles: A quick precipitation method. *Applied Sciences*. 9(20):4325. <https://doi.org/10.3390/app9204325>

Análisis comparativo de dos protocolos de aislamiento de ADN en hojas secas de mango (*Mangifera indica* L.) para uso en técnicas moleculares

Comparative analysis of two DNA isolation protocols in dried leaves of mango (*Mangifera indica* L.) for use in molecular techniques

Enrique Pardo-Pérez^{1*} ; Leandro Anaya-Palmera¹ ; Teodora Cavadía-Martínez¹ 

¹Universidad de Córdoba. Montería - Córdoba, Colombia; e-mail: epardop@correo.unicordoba.edu.co; leandroanayap@correo.unicordoba.edu.co; tcavadia@correo.unicordoba.edu.co

*autor de correspondencia: epardop@correo.unicordoba.edu.co

Cómo citar: Pardo-Pérez, E.; Anaya-Palmera, L.; Cavadía-Martínez, T. 2024. Análisis comparativo de dos protocolos de aislamiento de ADN en hojas secas de mango (*Mangifera indica* L.) para uso en técnicas moleculares. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 27(2):e2403. <http://doi.org/10.31910/rudca.v27.n2.2024.2403>

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 10 de 2023

Aceptado: agosto 31 de 2024

Editado por: Helber Adrián Arévalo Maldonado

RESUMEN

La obtención de ADN genómico de alta calidad es fundamental para la preservación de los recursos genéticos, especialmente, en especies de valor importante en la economía popular; sin embargo, la presencia de contaminantes, como polisacáridos, polifenoles y metabolitos secundarios en árboles frutales, dificulta la extracción de ADN puro. En este trabajo, se compararon dos métodos de extracción de ADN en tejido seco: un kit comercial y el método modificado de Doyle & Doyle. La cantidad y calidad del ADN extraído se evaluaron utilizando un espectrofotómetro y mediante electroforesis en gel de agarosa. Es importante señalar que el ADN obtenido con el kit comercial mostró presencia de compuestos aromáticos y proteínas, mientras que el método modificado de Doyle y Doyle logró obtener ADN de alta calidad, sin contaminantes, lo cual, se corroboró por la posterior amplificación, mediante PCR del ADN obtenido con cebadores SSR, mostrando bandas nítidas y bien definidas.

Palabras clave: Árboles frutales; Extracción de ADN; Diversidad genética; Preservación de recursos genéticos; Técnicas moleculares.

ABSTRACT

The extraction of high-quality genomic DNA is essential for the preservation of genetic resources, particularly in species of significant value to the popular economy. However, the presence of contaminants such as polysaccharides, polyphenols, and secondary metabolites in fruit trees complicates the extraction of pure DNA. In this study, two DNA extraction methods in dried tissue were compared: a commercial kit and the modified Doyle & Doyle method. The quantity and quality of the extracted DNA were assessed using a spectrophotometer and agarose gel electrophoresis. It is important to note that the DNA obtained with the commercial kit showed the presence of aromatic compounds and proteins, while the modified Doyle & Doyle method successfully yielded high-quality, contaminant-free DNA, as confirmed by subsequent PCR amplification using SSR primers, which showed clear and well-defined bands.

Keywords: DNA extraction; Fruit trees; Genetic diversity; Molecular techniques; Preservation of genetic resources.

INTRODUCCIÓN

El mango (*Mangifera indica* L.) es una reconocida fruta tropical de origen en el Noreste de la India, la región Indo-Birmánica y las montañas de Bangladesh (Mukherjee, 1957). El mango se destaca por su gran diversidad, pulpa carnosas, particular sabor y aroma, amplia aceptación y creciente demanda en los mercados internacionales (Maldonado *et al.* 2016).

En la actualidad, el perfeccionamiento de herramientas genéticas para el mango son escasas, por lo que muy poco han contribuido al mejoramiento genético de estos frutos, a nivel mundial. La diversidad genética es esencial para la producción agrícola sostenible, puesto que reduce la vulnerabilidad ante plagas y enfermedades (Zhou *et al.* 2002; Lobo, 2006); sin embargo, el fitomejoramiento depende de la riqueza genética del material utilizado para este fin (Cooper *et al.* 2001).

Las técnicas moleculares son fundamentales para la identificación y la diferenciación de plantas, integrando taxonomía, genética y evolución (Riley *et al.* 2023); no obstante, la extracción de ADN a partir de tejidos vegetales presenta desafíos, ya que muchas plantas contienen altos niveles de metabolitos secundarios (Avalos & Pérez-Urria, 2009; Lawal & Agbator, 2021), que pueden interferir con la PCR. La eliminación de estos metabolitos, a menudo, requiere una purificación adicional del ADN, mediante el uso de disolventes orgánicos. Los métodos moleculares empleados en estudios de diversidad genética de especies dependen de la obtención de ADN íntegro, puro y de la más alta calidad (Roudsary *et al.* 2022).

Para poder desarrollar eficientemente las herramientas moleculares es fundamental contar con protocolos de obtención de ADN, de buena concentración, alta pureza, baratos, sencillos y que no produzcan desechos tóxicos (Pommer & Murakami, 2009; Healey *et al.* 2014; Sánchez *et al.* 2021).

Para el aislamiento y la purificación de ADN de buena calidad, se utilizan métodos basados en la técnica de bromuro de cetiltrimetilamonio (CTAB), debido a su bajo costo (Pardo-Pérez *et al.* 2021; Asha *et al.* 2023). Por otro lado, existen kits comerciales, que permiten una extracción rápida de ADN; aunque son reproducibles y proporcionan material de alta pureza, una limitación de estos kits es su alto costo y la baja cantidad de ADN recuperado (Ríos *et al.* 2016).

Las hojas de mango tienen presencia de fenoles (Carrillo-Tomalá *et al.* 2020), los cuales, son compuestos químicos inhibidores (Sánchez *et al.* 2021), que se unen y precipitan el ADN (Azmat *et al.* 2012; Pardo-Pérez *et al.* 2021). Para el caso de la extracción de ADN en hojas tiernas de mango, Saldaña & Salazar (2007) reportan que, de los cuatro métodos usados, el descrito por Doyle & Doyle (1990), como el mejor en obtención de cantidad de ADN intacto.

Dada la dificultad para el procesamiento de las muestras en fresco y teniendo en cuenta la ausencia de un protocolo de extracción de ADN en tejido seco de mango, se hace necesario implementar

un método para aislar ADN en tejido seco, pues la mayoría de estas técnicas están estandarizadas para extraer ADN en tejido fresco (Kumari *et al.* 2018; Kumar *et al.* 2020). Por tal razón, el presente estudio tuvo como objetivo el análisis comparativo de dos protocolos de extracción de ADN en hojas secas de mango (*Mangifera indica* L.), para uso en técnicas moleculares.

MATERIALES Y MÉTODOS

Obtención de material biológico: Se colectaron hojas en fase madura de 15 árboles de mango, ubicados en la Vereda Km 12 de Montería (N 8°40'41.7", O 75°48'07.0"), las cuales, se colocaron en una bolsa resellable, que contenía gel de sílice y se almacenaron a temperatura ambiente.

Extracción de ADN: Se examinaron dos métodos de extracción de ADN: el kit comercial de extracción Wizard Genomic de Promega® (USA, Promega A1120), que se ejecutó atendiendo las indicaciones del fabricante y el método de Doyle & Doyle (1990), con las siguientes modificaciones: se reemplazó alcohol isoamílico 24:1, en vez de octanol, se centrifugó a 13.500rpm y se precipitó el ADN con una solución de etanol absoluto en reemplazo del isopropanol.

Concentración y pureza del ADN: La concentración (ng/μL) y la pureza del ADN obtenido se evaluaron espectrofotométricamente a 260 y 280 nm y la relación A260/A280, se utilizó para evaluar la contaminación con proteínas, empleando la espectrofotometría Colibri Microvolume Spectrometer (TitertekBerthold, Berthold Detection Systems GmbH, Bleichstrasse, Pforzheim, Germany), descrita por Brondmann (2008). Para verificar la integridad del ADN, se corrieron 5μL de ADN en una cámara de electroforesis (Clase II Owl separation Systems, Inc. Portsmouth, USA modelo B1A), en un gel de agarosa al 1,5 de (p/v), con TBE 1X como buffer y a un voltaje constante de 120 V, durante 90 min. Se hizo el ténido del ADN con Gelred Nucleic Acid 10000X water Merk y se visualizaron las bandas en un transiluminador DyNA Light™ UV (Labnet International Inc.).

Amplificación del ADN: Se hizo en un termociclador Bioard T100 #1861096 (Los Ángeles, USA), de los marcadores *MiIHR12a*, *MiIHR23a* y *MiIHR34b* (Ravishankar *et al.* 2011). El protocolo PCR se efectuó en un volumen final de 20μL, así: de 10μL de 2x DreamTaq HotStart PCR Master Mix (Thermo Scientific Lithuania); 2μL de cada primer; 7μL de agua estéril (Water Nuclease-free (Thermo Scientific Lithuania) y 1μL de ADN (100ng/μL). El programa empleado es 3 min a 95 °C; 30 s a 60 °C; 30 s a 56 °C; 2 min a 72 °C, repitiendo 23 ciclos del paso 2 al 4 y un paso final de extensión de 10 min a 72 °C.

Análisis estadístico: Los resultados fueron procesados con ayuda del paquete estadístico SPSS para Windows, versión 22.0 (SPSS Inc., 2018). En cada uno de los dos métodos de extracción utilizados, se determinaron medias y desviaciones estándar (s). En la determinación del método que muestra diferencias significativas en la concentración y calidad de ADN, se utilizaron las pruebas de Tukey y Dunnet (Miller, 1996). Para la estimación de la proporción

de éxito de las amplificaciones de los marcadores utilizados, se determinó mediante la prueba de Chi-cuadrado (Halos *et al.* 2004).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al comparar las metodologías utilizadas para la extracción de ADN a partir de hojas secas de mango (*Mangifera indica* L.), la que mejor resultados evidenció, en términos de concentración y de pureza, fue Doyle & Doyle (1990) con modificaciones, en donde la relación entre la cantidad de absorción resultante en 260 y 280 nm fue 1,9, lo que indica que la mayor parte de la absorción la realizan los ácidos nucleicos y, por tanto, el ADN extraído está bien calificado y su pureza es adecuada, mientras la relación para el kit Promega fue de 1,42, valor sensiblemente inferior, lo cual, puede indicar la presencia de proteínas, fenol u otros contaminantes, que se absorben fuertemente a 280 nm o cerca de ellos (Russo *et al.* 2022).

Además, el ADN extraído con el Kit presentó una coloración turbia durante el proceso de incubación, lo que muestra que para los ácidos nucleicos la turbidez revela presencia de compuestos aromáticos (fenoles) y proteínas (Sahu *et al.* 2012; Sánchez *et al.* 2021), los cuales, en sus formas oxidadas, se unen al ADN covalentemente, lo que resulta en un ADN inadecuado para la mayoría de las aplicaciones moleculares (Pommer & Murakami, 2009 y Sánchez *et al.* 2021), mientras que para el protocolo Doyle y Doyle modificado, resultó un ADN traslúcido, que se ajusta a lo reportado por Sánchez *et al.* (2021), donde obtuvieron, por el método Doyle y Doyle, para hojas liofilizadas de guayaba (*Psidium guajava* L.), un ADN incoloro. Asimismo, el ADN traslúcido revela una extracción limpia y de calidad, evidenciado en la relación de absorbancia A260/A280.

Los resultados mostraron para el rendimiento de ADN y la pureza del ADN utilizando un espectrofotómetro UV, un mayor

rendimiento de ADN con el método de Doyle y Doyle modificado (289,7±42,0 ng/μL), mientras que el menor se obtuvo con el método Kit Promega (95,9±31,8 ng/μL) (Tabla 1).

En la prueba de comparación entre medias de Tukey, el método Doyle y Doyle modificado fue el que obtuvo la mayor concentración de ADN, lo que indica que, en este caso, sí fue posible obtener buena cantidad de ADN. Al comparar los resultados mediante la prueba de Dunett, se encontraron diferencias significativas y mayores concentraciones de ADN para el método Doyle y Doyle modificado (Tabla 1)

En la tabla 2, se observa que el mayor porcentaje de efectividad en la amplificación se obtuvo a partir del ADN extraído por el método de Doyle y Doyle modificado, siendo del 90 %, para cada uno de los tres marcadores. Este resultado se podría relacionar con la calidad del ADN que se obtuvo mediante el protocolo, debido a que las muestras extraídas con el método Doyle & Doyle modificado evidenciaron un valor promedio de 1,9, lo cual, se ajusta a lo reportado por Russo *et al.* (2022) y Pérez *et al.* (2011), quienes argumentaron que muestras de ADN con valores entre 1,8 y 2,0 son más estables en cuanto a calidad y pureza, por ser poco susceptibles a contaminantes, siendo este ADN óptimo para amplificar con la mayoría de marcadores. También, se puede observar que el porcentaje efectivo de amplificaciones para ADN extraído por el método de Kit de Promega evidenció 0 % en los tres marcadores, lo cual, se pudo deber a la contaminación por metabolitos secundarios, resultado que se ajusta a lo indicado por Pardo-Pérez *et al.* (2021) y Ferreira & Grattapaglia *et al.* (1998), quienes expresaron que la presencia de estos metabolitos en ácidos nucleicos inhibe la acción de la Taq polimerasa.

Tabla 1. Comparación de medias para la eficiencia de dos métodos diferentes de extracción de ADN, mediante la prueba de rangos múltiples de Duncan (P ≤ 0,01), en muestras de hojas secas de *Mangifera indica* L.

Concentración y pureza	Kit Promega	Método <i>Mini-prep</i>
	μ (±s)	
Índice de calidad 260/280	1,42 (0,04)	1,9 (0,108)
Rendimiento de ADN (ng/μL)	95,9 (31,8)	289,7 (42,0)

Tabla 2. Eficiencia de amplificación de los protocolos de extracción de ADN evaluados.

Locus	Metodologías evaluadas	Amplificaciones efectivas	Porcentaje de amplificaciones
<i>MiIIHR12a</i>	A	9	90%
	B	0	0%
<i>MiIIHR23a</i>	A	9	90%
	B	0	0%
<i>MiIIHR34b</i>	A	9	90%
	B	0	0%
A: Kit de extracción Wizard de Promega®; B: Mini-prep modificado.			

Agradecimientos: La presente investigación se realizó gracias al financiamiento de la Universidad de Córdoba.

Conflicto de intereses: El manuscrito fue preparado y revisado con la participación de todos los autores, quienes declaramos que no existe conflicto de interés que pondría en peligro la validez de los resultados presentados. **Contribución de los autores:** Teodora Cavadía Martínez: conceptualización, metodología, obtención de datos; Leandro Anaya Palmera: metodología, escritura, revisión, edición; Enrique Pardo Pérez: conceptualización, validación, análisis formal, escritura, revisión y edición. Todos los autores participaron en la redacción, revisión, edición del manuscrito y aprueban la versión final.

REFERENCIAS

- ASHA, K.I.; ASWANI S.A.; KRISHNA RADHIKA N.; PRAKASH KRISHNAN, B.S. 2023. Genetic variability and diversity analysis of Chinese potato (*Solenostemon rotundifolius* (poir.) J. K. Morton) germplasm using morphological and molecular markers. South African Journal of Botany. 155:171-177. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2023.02.014>
- AVALOS, A.; PEREZ-URRIA, E. 2009. Metabolismo secundario de plantas. Reduca (Biología). Serie Fisiología Vegetal. 2(3):119-145.
- AZMAT, M.A.; KHAN, I.A.; CHEEMA, H.M.N.; RAJWANA, I.A.; KHAN, A.S.; KHAN, A.A. 2012. Extraction of DNA suitable for PCR applications from mature leaves of *Mangifera indica* L. Journal of Zhejiang University: Science B. 13(4):239-243. <http://dx.doi.org/10.1631/jzus.B1100194>
- BRONDMANN, P. 2008. DNA extraction from different matrices. Molecular Biology Methods for Traceability Purposes, BfR Berlin, Germany. p.18-19.
- CARRILLO-TOMALÁ, C.; DÍAZ-TORRES, R.; GUERRA-GUAMÁN, K.; ROMÁN-SALMERÓN, A. 2020. Actividad antimicrobiana de extractos hidroalcohólicos de hojas de dos variedades de *Mangifera indica* L. Revista Ciencia UNEMI. 13(32):69-77. <http://doi.org/10.29076/issn.2528-7737vol13iss32.2020pp69-77p>
- COOPER, H.D.; SPILLANE, C.; HODGIN, T. 2001. Broadening the genetic base of crops: an overview. En: Broadening the genetic base of crop production. Cooper, H.D.; Spillane, C.; Hodgin, T. (eds.). CABI Publishing. Estados Unidos. p.1-23.
- DOYLE, J.J.; DOYLE, J.L. 1990. Isolation of plant DNA from fresh tissue. Focus. 12(1):13-15.
- FERREIRA, M.E.; GRATTAPAGLIA, D. 1998. Introducción al uso de marcadores moleculares en el análisis genético. Embrapa-Cenargem. Brasília D.F. 220p.
- HALOS, L.; JAMAL, T.; VIAL, L.; MAILLARD, R.; SUAUA, A.; LE MENACH, A.; BOULOUIS, H.J.; VAYSSIER-TAUSSAT, M. 2004. Determination of an efficient and reliable method for ADN extraction from ticks. Veterinary Research. 35:709-713. <https://doi.org/10.1051/vetres:2004038>
- HEALEY, A.; FURTADO, A.; COOPER, T.; HENRY, H.J. 2014. Protocol: a simple method for extracting next-generation sequencing quality genomic DNA from recalcitrant plant species. Plant Methods. 10:1-8. <https://doi.org/10.1186/1746-4811-10-21>
- KUMAR, C.; KUMAR, R.; SINGH, S.; GOSWAMI, A.K.; PALIWAL, R.; SINGH, R. 2020. Development of novel g-SSR markers in guava (*Psidium guajava* L.) cv. Allahabad Safeda and their application in genetic diversity, population structure and cross species transferability studies. PLoS ONE. 15(8):e0237538. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0237538>
- KUMARI, S.; ARUMUGAM, N.; SINGH, R.; SRIVASTAV, M.; BANOTH, S.; MITHRA, A.C.; ARUN, M.B.; GOSWAMI, A.K.; KHAN, A.J. 2018. Diversity analysis of guava (*Psidium guajava*) germplasm collection. Indian Journal of Agricultural Sciences. 88(3):489-497. <https://doi.org/10.56093/ijas.v88i3.78740>
- LAWAL, A.; AGBATOR, V.E. 2021. Extraction of high-quality genomic DNA from *mansonina altissima* for microsatellite analysis. Journal of Research in Forestry, Wildlife and Environment. 13(4):115-119.
- LOBO, M. 2006. Recursos genéticos y mejoramiento de frutales andinos: Una visión conceptual. Ciencia y Tecnología Agropecuaria. 7(2):40-54. https://doi.org/10.21930/rcta.vol7_num2_art:68
- MALDONADO, Y.I.; NAVARRETE, H.A.; ORTIZ, Ó.D.; JIMÉNEZ, J.; SALAZAR, R.; ALIA, I.; ÁLVAREZ, P. 2016. Physical, chemical and antioxidant properties of mango varieties grown at the Guerrero coast. Revista Fitotecnia Mexicana. 39(3):207-214.
- MILLER, R.G. 1996. Simultaneous Statistical Inference. McGraw-Hill. New York, Estados Unidos. 272p.
- MUKHERJEE, S.K. 1957. Cytology of some Malayan species of *Mangifera*. Cytologia. 22:239-241.
- PARDO-PÉREZ, E.; CORONADO-GONZÁLEZ, J.L.; BEGAMBRE-HERNÁNDEZ, M. 2021. Comparación de dos métodos de extracción de ADN a partir de hojas secas de guayaba (*Psidium guajava* L.) para estudios moleculares. Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica. 24(1):e1504. <https://doi.org/10.31910/rudca.v24.n1.2021.1504>

- PÉREZ, I.; ANGULO, L.; OSORIO, G.; RAMIS, C.; BEDOYA, A.M., FIGUEROA, R.; MOLINA, S.; INFANTE, D. 2011. Método modificado de obtención de ADN genómico en orquídeas (*Cattleya* spp.): para amplificación con marcadores moleculares. *Bioagro*. 23:(1)27-34.
- POMMER, C.V.; MURAKAMI, K.R.N. 2009. Breeding Guava (*Psidium guajava* L.). En: Jain, S.M.; Priyadarshan, P.M. (eds). Breeding plantation tree crops: Tropical species. Springer. Estados Unidos. pp.83-120 https://doi.org/10.1007/978-0-387-71201-7_3
- RAVISHANKAR, K.V.P.; BELLAM, H.R.M.; LALITHA, A.; MAKKI, R.D. 2011. Development of new microsatellite markers from mango (*Mangifera indica*) and cross-species amplification. *American Journal of Botany*. 98(4):e96-e99. <https://doi.org/10.3732/ajb.1000263>
- RILEY, I.J.; DIBATTISTA, J.D.; STEWART, J.; SCHILLING, H.T.; SUTHERS, I.M. 2023. Using integrative taxonomy to distinguish cryptic halfbeak species and interpret distribution patterns, fisheries landings, and speciation. *Marine and Freshwater Research*. 74:125-143. <https://doi.org/10.1071/MF22048>
- RÍOS, E.; CALLEROS, E.; GONZÁLEZ, A.; MARTÍNEZ, O.; MARTÍNEZ, A.; HERNÁNDEZ, S.; PÉREZ, R. 2016. Análisis comparativo de diferentes métodos de extracción de DNA y su eficiencia de genotipificación en población mexicana. *Multidisciplinary Scientific Journal Acta Universitaria*. 26(4):56-65.
- ROUDSARY, L.J.; JAFARI, A.; VAEZI, J.; KARIMI, E. 2022. A simple and efficient DNA extraction protocol for old herbarium leaves of *Bellevia* (*Asparagaceae*, *Scilloideae*). *Nova Biologica Reperta*. 9(2):124-131. <http://dx.doi.org/10.52547/nbr.9.2.124>
- RUSSO, A.; MAYJONADE, B.; FREI, D.; POTENTE, G.; KELLENBERGER, R.T.; FRACHON, L.; COPETTI, D.; STUDER, B.; FREY, J.E.; SCHLÜTER, P.M.; GROSSNIKLAUS, U. 2022. Low-input high-molecular-weight DNA extraction for long-read sequencing from plants of diverse families. *Frontiers in Plant Science*. 13:1494. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.883897>
- SAHU, S.K.; THANGARAJ, M.; KATHIRESAN, K. 2012. DNA extraction protocol for plants with high levels of secondary metabolites and polysaccharides without using liquid nitrogen and phenol. *Molecular Biology*. 6:1-6. <https://doi.org/10.5402/2012/205049>
- SALDAÑA, G.; SALAZAR, E. 2007. Aislamiento de ADN de calidad para la amplificación al azar de ADN polimórfico de mango. *Agronomía Tropical*. 57(4):281-286.
- SÁNCHEZ, E.; MORA, E.; BARRANTES, W. 2021. Aislamiento de ADN de alta calidad en *Psidium guajava* L. para estudios genómicos. Nota técnica. *Revista Agronomía Mesoamericana*. 32(2):638-649. <https://doi.org/10.15517/am.v32i2.41606>
- SPSS. 2018. SPSS for Windows. Release V.22.0 Chicago, 1: SPSS Inc, Disponible desde Internet en: <https://www.ibm.com/support/pages/spss-statistics-220-available-download>
- ZHOU, X.; CARTER, T.E.; ZHANGLIN, CUI.; MIYAZAKI S.; BURTON, J. 2002. Genetic diversity patterns in Japanese soybean cultivars based on coefficient of parentage. *Crop Science*. 42:1331-1342. <https://doi.org/10.2135/cropsci2002.1331>

Evaluation of sampling methods of *Diaphorina citri* Kuwayama (Hemiptera: Liviidae) in two citrus growing areas

Evaluación de métodos de muestreo de *Diaphorina citri* Kuwayama (Hemiptera: Liviidae) en dos áreas cítricas

Lumey Pérez-Artiles¹ ; José Mauricio Montes-Rodríguez^{2*} ; Madeleyne Parra-Fuentes¹ 

Carlos Esteban Brochero-Bustamante¹ ; Juan Felipe Ossa-Yepes² ; Luisa Fernanda Guzmán-Sánchez¹ 

¹Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – Agrosavia, Centro de Investigación Caribia. Zona Bananera, Magdalena – Colombia; e-mail: lpereza@agrosavia.co; mparra@agrosavia.co; cbrochero@agrosavia.co; lfguzman@agrosavia.co

²Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – Agrosavia, Centro de Investigación La Suiza. Rionegro, Santander – Colombia; e-mail: jmontesr@agrosavia.co; jfossa@agrosavia.co

*corresponding autor: jmontesr@agrosavia.co

How to cite: Pérez-Artiles, L.; Montes-Rodríguez, J.M.; Parra-Fuentes, M.; Brochero-Bustamante, C.E.; Ossa-Yepes, J.F.; Guzmán-Sánchez, L.F. 2024. Evaluation of sampling methods of *Diaphorina citri* Kuwayama (Hemiptera: Liviidae) in two citrus growing areas. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 27(2):e2724. <http://doi.org/10.31910/rudca.v27.n2.2024.2724>

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 30, 2024

Accepted: October 18, 2024

Edited by: Helber Adrián Arévalo Maldonado

ABSTRACT

Efficient, easy to implement and low-cost monitoring methodologies are necessary to obtain information on arthropod pest populations and to implement the most convenient and timely phytosanitary control practices. To optimize the sampling and monitoring of the Asian citrus psyllid, *Diaphorina citri* (Hemiptera: Liviidae), an insect associated with the transmission of *Candidatus Liberibacter asiaticus* and *Ca. L. americanus*, which cause Huanglongbing (HLB), a disease with a great impact on citrus orchards, three methods of adult sampling (yellow sticky traps, sweep net, and stem tap) were evaluated. For immature sampling, vegetative shoots were checked. The results demonstrate that the population density at the time of sampling affects the effectiveness and sensitivity of the sampling methods. Yellow sticky traps capture more adults and are the only effective method at low psyllid densities. Stem tap and sweep net are less expensive methods; however, they do not detect adults nor correlate with the number of nymphs and eggs in vegetative shoots when adult density is low. For adults, an optimal sample size was determined for each method. For yellow sticky traps, 3 to 5 traps for a 2-hectare plot with weekly frequency are recommended. For immatures, it is recommended to estimate the percentage of infestation by inspecting 45 to 55 vegetative shoots well-distributed within a 2-hectare plot, as a practical measure for farmers and extensionists to monitor *D. citri*.

Keywords: Huanglongbing; Integrated pest management; Monitoring; Sticky traps; Vectors

RESUMEN

Metodologías de monitoreo eficientes, fáciles de implementar y de bajo costo, son necesarias para obtener información sobre las poblaciones de artrópodos plaga e implementar las prácticas de control fitosanitario más convenientes y oportunas. Con el fin de optimizar el monitoreo del psílido asiático de los cítricos *Diaphorina citri*, vector de Huanglongbing, enfermedad con gran impacto en plantaciones de cítricos, se evaluaron tres métodos de muestreo de adultos: trampas pegajosas amarillas, pase de jama y golpeteo o golpe de rama. Para el muestreo de inmaduros se inspeccionaron brotes vegetativos. La densidad poblacional en el momento del muestreo afecta la efectividad y sensibilidad de los métodos de muestreo. Las trampas pegajosas amarillas tienen más capturas de adultos y por su sensibilidad es el único método conveniente con baja densidad del psílido. La adopción de los métodos de golpe de rama y pase de jama es más económica; sin embargo, no detectan adultos, ni se correlacionan con el número de ninfas y huevos en brotes vegetativos, cuando la densidad de adultos es baja. Para adultos, se determinó un tamaño de muestra óptimo para cada método de muestreo. Se recomiendan monitoreos de adultos semanales con 3 a 5 trampas amarillas pegajosas en un lote de dos hectáreas (has). Para inmaduros se recomienda estimar el porcentaje de infestación a partir de la inspección de 45 a 55 brotes vegetativos bien distribuidos dentro de un lote de dos has, como una medida práctica para monitorear *D. citri*, por parte de agricultores y extensionistas.

Palabras clave: Huanglongbing; Manejo integrado de plagas; Monitoreo; Trampa pegajosa; Vector.

INTRODUCTION

Huanglongbing (HLB) or citrus greening is a disease caused by the bacterium *Candidatus Liberibacter asiaticus*, which restricts to the phloem, reduces the quality and quantity of production, and subsequently causes plant death (Dala-Paula *et al.* 2019; Achor *et al.* 2020). It has already been detected in citrus crops in Asia, Africa, and America (Parnell *et al.* 2019). The social, environmental, and economic impact has been significant in the main production centers of the world where it has become established (Costa *et al.* 2021).

In Colombia, this disease was reported in 2015, nevertheless, its vector, *Diaphorina citri* (Hemiptera: Liviidae), is present in much of the national territory, the disease remains primarily restricted to the Caribbean region (ICA, 2017) and Santander (ICA, 2023). However, the potential distribution of HLB and its vector, *D. citri*, suggests that most of the Colombian citriculture is at risk of contracting the disease (Olvera-Vargas *et al.* 2020).

Within integrated vector management, in areas with and without HLB, it is essential to have efficient, sensitive, easy-to-adopt, and low-cost sampling methodologies (Monzo *et al.* 2015). Monitoring and the use of action thresholds for *D. citri* control are necessary because they have the potential to reduce insecticide applications, mainly in areas with the disease, where calendar-based applications are made (Monzo & Stansly, 2017). Several studies have evaluated sampling techniques typically used for capturing hemipterans and have highlighted their disadvantages and advantages for *D. citri* sampling (Hall, 2009; Stansly *et al.* 2010). In some cases, the most effective methods for capturing adults have been identified, and in others, the optimal number of samples has been determined (Hall *et al.* 2007; Sétamou *et al.* 2008; Monzo *et al.* 2015; Leong *et al.* 2019).

Under current Colombian regulations, all citrus orchard owners are required to monitor for *D. citri* and control it if necessary. The same applies to live fences of myrtle (*Murraya paniculata*) or limon swinglea (*Swinglea glutinosa*), which are alternate host plants for the vector and the disease (Santos *et al.* 2020). Farmers and extensionists use monitoring strategies based on research generated in subtropical regions and countries with environmental conditions different from those in Colombia. Ideally, monitoring methodologies should be validated for each region (Varón-Devia *et al.* 2020).

Although the sampling methodologies proposed for other countries are low-cost, it is not known how sensitive and reliable they can be in the citrus-growing areas of Colombia. The best method, in addition to regional variability, could depend on the sampling objectives. Sampling in areas with HLB, where the incidence should be zero, is different from areas without HLB, where the objective is to reduce populations (Varón-Devia *et al.* 2020).

Therefore, different methods for monitoring immatures and adults of *D. citri* were compared to generate an efficient sampling strategy in two citrus growing areas of Colombia: The Caribbean coast and the department of Santander in the Andean region.

MATERIALS AND METHODS

Study area. The study was conducted in the Andean region in the municipality of Girón, Santander, a region without the presence of the disease during the experiment (Figure 1). In a four-year-old organic Tahiti acid lime orchard located at coordinates 6°59'42.5"N; 73°10'24.2"W, at an altitude of 809 meters above sea level, sampling was carried out biweekly from December 2019 to November 2020.

On the Colombian Caribbean coast, sampling was conducted in a Tahiti acid lime orchard with the presence of the disease. The orchard is in the municipality of Dibulla, La Guajira, a department affected by HLB since 2015, with coordinates N 11°14'18.36"; W 73°32'2.43" (Figure 1). Biweekly sampling was conducted from February to November. HLB is present in this orchard, as in the entire department.

Sampling in citrus orchards. A 2-hectare planting area was delimited and divided into 10 individual 0.2-hectare plots in the two locations. Four trees were selected per plot for 40 trees in total. In all samplings, the same trees were evaluated using the following capture methodologies:

Yellow Sticky trap: Letter-size (23x30 cm) 520 - 615 nm traps were used, suspended 1.5 m above the ground near the outside of a branch canopy. The traps were changed every 15 days, and two traps were placed on opposite sides of the tree.

In Girón samplings, in 19 of the 40 trees, the traps were placed in the north and south orientation of the tree, while in the remaining ones, it was east and west. In the Dibulla samplings, all pairs of traps per tree were in the north and south orientation. The arrangement of the traps and the difference between the two regions was because in the Caribbean region it was known from previous studies the predominance of north-south winds, since the wind direction is correlated with the dispersion of *D. citri* (Johnston *et al.* 2019), the location of the traps in the north-south orientation was preferred. While in Santander the predominant wind direction was unknown, and the four cardinal points were evaluated. To count the adults of *D. citri*, the traps were placed in properly labeled plastic bags and then carefully checked using a stereomicroscope.

Stem-tap: A branch was randomly selected, which must be 1.5 m high and outside the tree canopy. This branch was repeatedly tapped three times with a 0.5-inch diameter PVC pipe, while a rectangular plastic tray, preferably white, was placed under the branch. In this way, all adult psyllids that fell from the branch to the tray were quickly counted before they escaped.

Sweep net: Twice per tree, three double passes were made with the sweep net, making sure to pass through the buds and branches of the tree, but without entanglement. Subsequently, the interior of the net was observed to count the total number of adults captured. In Girón, this methodology was applied on 10 of the 14 sampling dates.

In addition, four shoots were randomly collected per tree in Girón. While in Dibulla two were collected, one in the north orientation of the tree canopy and the other in the south. These shoots were placed



Figure 1. Departments and municipalities in Colombia of capture of adults of the Asian citrus psyllid *Diaphorina citri* with three sampling methods.

in paper bags in coolers with refrigerant gel to prevent them from drying out. The number of *D. citri* eggs and nymphs in each shoot was carefully examined and counted using a stereomicroscope.

Statistical analysis. To compare the abundance and incidence of *D. citri* adults detected by the sampling methods: yellow sticky traps, stem-tap, and sweep net, a Friedman test was performed, which is a non-parametric alternative when paired data are available.

For abundance, the two replicates of each sampling methodology were added to have a single value per tree and per sampling date. In the case of incidence, the percentage of trees with *D. citri* from each sampling date was compared between sampling methodology, also with a paired analysis of the data. Comparisons were made separately for each location.

Nested analyses of variance were performed for each sampling method, with trees nested in each plot, nested in sampling dates. The count data for this analysis will be log transformed [$\log(x+1)$].

The analysis of variance for egg and nymph counts on shoots was carried out with the information from the sampling dates with the highest sprouting when all 40 trees in the trial had shoots.

The test to define the optimal number of samples (Sétamou *et al.* 2008; Leong *et al.* 2019), was performed. This analysis considers that there are two levels or sampling factors, the variance between trees and

between sampling units within the same tree. The optimum number of trees to be sampled is obtained using the following equation.

$$t = \frac{\left(\delta t^2 + \frac{\delta u^2}{u} \right)}{(\bar{x} + E)^2}$$

The variance components between trees and between sampling units within the same tree were estimated using the statistical program StatGraphics Centurion version XV.

On the other hand, “*u*”, refers to the number of sampling units such as traps, stem tap or net passes within the same tree; “*E*”, refers to the deviation with respect to the mean, we worked with 25% and 10% (0.25 and 0.1 in the equation respectively). For pest management decisions, estimates with a deviation of 25% from the mean are considered acceptable (Southwood & Henderson, 2000).

To evaluate the relationship between adults and immatures, a correlation matrix was performed between the count of eggs and nymphs in shoot and the count of adults for each adult sampling methodology, a non-parametric Spearman rank correlation coefficient (ρ) was estimated with the PAST version 1.86b program. Sampling points without flush shoots due to the impossibility of recording immatures of *D. citri*, as well as sampling points with captures of adults ≤ 2 individuals in the entire evaluated period, were not included. To evaluate the differences between quadrants, East-West and North-South, the Wilcoxon signed-rank test was performed, which is a nonparametric paired analysis.

In addition, a correlation was made between egg and nymph counts and percent shoot infestation in each 0.2 ha plot to assess the possibility that percent infestation, which is an easier measure to gather in the field, could replace the more cumbersome and inaccurate nymph and egg counts.

To determine the optimal number of trees to sample for the percentage of shoot infestation, the proposal in Southwood & Henderson (2000) was used to sample the frequency of occurrence of an event with the following equation:

$$N = \frac{t^2 p(1-p)}{D^2}$$

Where “*N*” is the number of shoots to be sampled; “*p*” is the preliminary value of the probability of the event, in this case, the average infestation percentage of all samplings, “*D*” is as half the width of the confidence limit regarding the estimate of the mean in decimal, “*t*” is the value of the student t distribution, which depends on the number of samples and is approximated to 2 with more than 20 samples.

RESULTS AND DISCUSSION

Evaluation of adult sampling methods. Significant differences were found between the adult sampling methods (Figure 2). Yellow traps captured more adults, even at sampling points that did not record adults with the sweep net and stem tap, yellow traps reached mean values of 7.44 adults/tree in Girón and 0.65 adults/tree in Dibulla. Likewise, the sweep net method in Dibulla presented 2 captures of adults in the entire sampling period. Between the sweep net and stem tap methods differences were present only in Girón (Figure 2). Studies demonstrated that yellow traps were the most efficient sampling method at low densities because they have 14 times more sensitivity in capturing adults (Monzo *et al.* 2015; Miranda *et al.* 2017). Yellow traps were also considered the best option in areas with the presence of HLB, with intensive management with pesticides, where it is more important to detect the presence than to estimate its population (Miranda *et al.* 2017; Varón-Devia *et al.* 2020). Monzo *et al.* (2015) indicate that the yellow trap method was more sensitive and convenient in periods with little or no sprouting and low densities of adults, as well as during the dry season or the phenological stage of fruit filling as recommended by Varón-Devia *et al.* (2020).

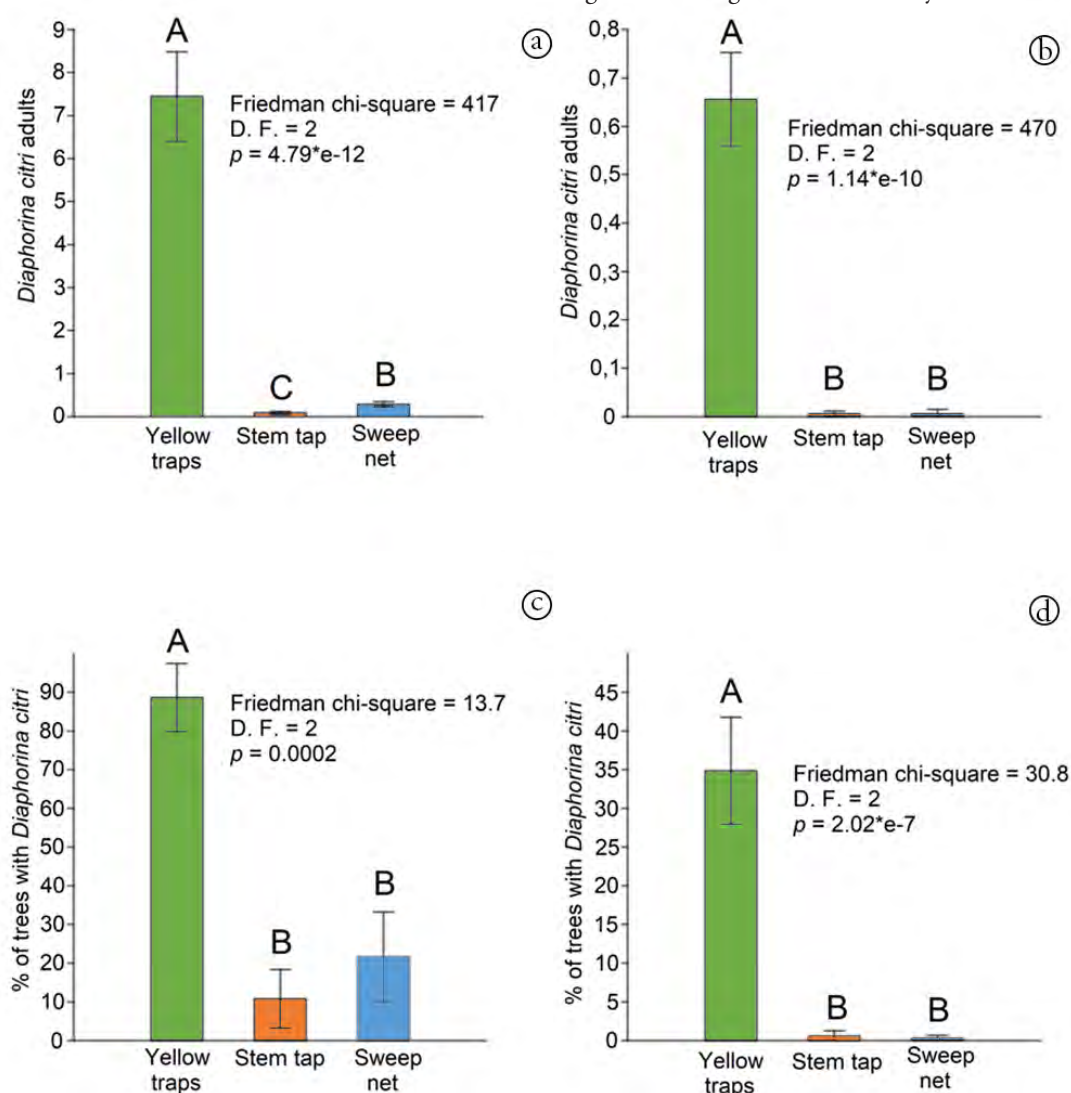


Figure 2. Capture of adults of the Asian citrus psyllid *Diaphorina citri* with three sampling methods. Abundance: a. Girón - Andean region; b. Dibulla - Caribbean coast. Presence - Absence: d. Girón - Andean region; e. Dibulla - Caribbean coast.

Comparison tests between treatments with Wilcoxon rank sum test with Bonferroni correction, different letters indicate significant differences.

The density of adults of *D. citri* in the crops monitored in this research was 3.78 and 0.33 adults per biweekly trap in Girón and Dibulla, respectively, with a record for these same localities of 6.4% and 0.3% incidence of *D. citri* by the stem-tap method. Clearly, the density of adults at the time of sampling can influence the choice of the most convenient method. Hall *et al.* (2007) found an average density of 14.8 adults per yellow trap per week. At this density, the tapping method is efficient and registers adults in 80% of the trees where the yellow traps also reported them. Therefore, they recommend the stem tap method because it has a similar or greater efficiency than yellow traps with less investment of resources and time. Monzo *et al.* (2015) also found that the stem tap method was the most efficient with medium and high densities of *D. citri* adults, delimited as more than 0.1 adults per stem tap.

Yellow sticky traps have been used extensively to understand key aspects of *D. citri* biology, such as distribution and seasonal variation, and to make management decisions at regional and farm level (Miranda *et al.* 2017; Díaz-Padilla *et al.* 2021; Álvarez-Ramos *et al.* 2022). However, for an adequate interpretation of the sampling data with yellow sticky traps, it is necessary to consider several aspects. First, the method evaluates the presence of adults during a period and not at a specific time. Therefore, sudden changes in populations, due to factors such as pesticide applications, climatic events, or other factors could underestimate or overestimate the adult populations. On the other hand, because the *D. citri* life cycle at 27°C is 14±1.2 days (Botero *et al.* 2014), a weekly monitoring frequency is recommended to improve the estimation of adults. It is also necessary to consider that yellow traps show correlation with climatic variables such as temperature, light, and wind direction, which can affect estimates of *D. citri* populations with respect to the time of sampling and tree canopy location (Hall, 2009; Johnston *et al.* 2019).

The captures of *D. citri* for the East-West ($P=0.018$; $W=9888$; $n=273$) and North-South ($P<0.0001$; $W=10800$; $n=247$) quadrants showed significant differences in the Girón crop, with a greater number of individuals in the east and south. Although environmental factors that affect the dispersal of *D. citri*, such as wind speed and direction (Antolínez *et al.* 2022), were not measured, the greater capture in the south can be more related to the proximity to an abandoned citrus orchard, without pest management, and with high incidence of *D. citri*. In Dibulla, no difference was found between north and south orientation ($P<0.73$; $W=0.000115$; $n=680$).

Optimal sample size. In all methods, highly significant differences were found between sampling dates, demonstrating that *D. citri* populations are affected over time by sprouting periods. In Girón, for plots and trees within plots, differences were detected in the capture of adults by the yellow trap method and in the presence of nymphs and eggs on shoots (Table 1).

In Dibulla, the results are the same as in Girón for the sticky traps, but there are no differences in the sampling by stem tap and sweep net, influenced by the low number of individuals collected by these methods.

The optimum sample size for the yellow traps is in accordance with the recommendations of other authors (Table 2), and for plots of 2 ha, it would be between 3 and 5. While the sample size for stem tap method and sweep net recommendations in the bibliography are higher (Table 2).

These authors do not perform a statistical analysis to support these recommendations. However, more samples allow a better estimation, and the optimal number of samples is variable over time with factors such as the population mean (Monzo *et al.* 2015). The proposed values (Table 2) should be understood as a reference and if resources are available, it is recommended to increase the precision and take a greater number of samples.

Correlation between adults sampling and immatures. Sampling with yellow traps shows a correlation with the presence of nymphs and eggs in shoots in the two locations, while the correlation with stem tap was significant only in Girón Santander (Table 3).

The sweep net method was not correlated with *D. citri* immatures at either location. The data suggest that as the density of *D. citri* populations increases, the correlation between sampling methods for adults increases. And the correlation between these and the number of immatures in shoots also increases.

Quantifying the number of eggs and nymphs in the field is time-consuming and inaccurate. However, a relationship has been found between the percentage of shoot infestation and the number of eggs and nymphs of *D. citri* (Sétamou *et al.* 2008; Stansly *et al.* 2010). Therefore, the percent infestation could be used as a surrogate measure for the number of immatures in shoots if there is sufficient correlation between the two variables. In Girón Santander, the percentage of infestation was correlated with the number of nymphs in shoots ($\rho = 0.86$; $p = 1.16e-24$) and eggs ($\rho = 0.64$; $p = 8.9e-11$).

Few farmers monitor *D. citri* population; only those who export do so because they must comply with good agricultural practices (GAP). They measure the percentage of immature infestation in shoots and use thresholds of 10 to 15% for pest management decisions. This threshold, although arbitrary, is stricter or more conservative than the one proposed by Monzo & Stansly (2017), of 0.2 average adults per stem tap, which was only reached at one sampling time (0.25 in Girón), while 15% or more of shoot infestation was reached in almost all sampling dates. It is important to complement the sampling of the percentage of immature infestation in shoots with an estimation of flush shoot density (Stansly *et al.* 2010).

Resources invested in sampling implementation. Considering materials and labor time, the implementation costs for the stem-tap method are estimated at \$25,250 (\$ = Colombian pesos) for 2 ha plot, and for the sweep net method at \$110,250, for only one sampling. However, all materials can be reused, and considering that the evaluation is performed in one hour per week, the costs are approximately \$344,000 annually for the stem-tap method and \$429,000 for the sweep net method. For the yellow sticky

trap method, the cost of a single sampling with two yellow traps is estimated to be \$63,250. If the yellow stick traps are not reused, \$635,000 would be spent per year. In addition, training is required for the identification of *D. citri* adults in the trap, a task that requires

at least a five-fold magnifying glass (5X). Finally, the visual inspection method for immatures costs 52,250 per sampling and 371,000 per year.

Table 1. Nested analysis of variance for *Diaphorina citri* sampling methods.

Source of variation	Girón, Santander		Dibulla, Guajira	
	D. F.	M. S.	D. F.	M. S.
YELLOW STICKY TRAPS				
Date sampling	12	5,88**	16	0,184**
Plot (0.2 ha)	117	0,21**	153	0,035**
Tree	390	0,14**	510	0,031**
STEM TAP				
Date sampling	13	0,027**	14	0,00039
Plot (0.2 ha)	126	0,003	135	0,00045**
Tree	420	0,004*	450	0,00025
SWEEP NET				
Date sampling	9	0,0954**	16	0,000316
Plot (0.2 ha)	90	0,0154	153	0,000333
Tree	300	0,0111	510	0,000333
EGGS ON FLUSH SHOOTS				
Date sampling	7	0,215**	6	0,283
Plot (0.2 ha)	72	0,159**	42	0,099
Tree	240	0,118**	49	0,211**
NYMPHS ON FLUSH SHOOTS				
Date sampling	7	2,304**	6	0,299**
Plot (0.2 ha)	72	0,267**	42	0,140*
Tree	240	0,194**	49	0,134**

D. F. = Degrees of freedom; M. S. = Mean Square. * $P < 0,05$; ** $P < 0,01$.

Table 2. The Optimal sample size for sampling methods for the citrus Asian psyllid *Diaphorina citri* in a 2-ha citrus orchard.

Optimal sample size for sampling methods	Deviation from the mean				Other references				
	0,25		0,1		Trees (Flushes/tree)				
ADULTS Trees to sample	G	D	G	D	Bouvet & Hochmaier (2020)	Stansly <i>et al.</i> (2010)	Monzo <i>et al.</i> (2015)	Sétamou <i>et al.</i> (2008)	Leong <i>et al.</i> (2019)
Yellow traps (two per tree)	2	4	7	16					
Yellow traps (one por tree)	3	5	8	20			22		
Stem tap (two per tree)	7	6	40	40	80				
Stem tap (one per tree)	9	9	52	55		10	75		
Sweep net (two per tree)	6	12	32	75					
Sweep net (one per tree)	9	16	45	100			36		
IMMATURE Trees to sample	G	D	G	D					
Eggs (four flushes per tree)	15	11	67	41	40 (2)			3 (8)	4 (6)
Nymphs (four flushes per tree)	12	7	46	28	40 (2)			10 (6)	3 (4)
% Infestation (Flushes to sample)	55	45	344	279		10			

G= Girón, Santander. D= Dibulla, Guajira.
Bouvet & Hochmaier (2020) recommend values per Ha, except for yellow traps, with 5 in plots of less than 5-ha.
Stansly et al. (2010) data for 2-ha, explicitly the data is not presented by the author for 1-ha but based on conversion of an average lot of 50 acres = 20 ha.

Table 3. Correlation matrix of sampling methods for adults and immatures of the Asian citrus psyllid *Diaphorina citri*.

Girón, Santander						
Correlation \ p n=461	Yellow traps	Stem tap	Nymphs on flushes	Eggs on Flushes	Sweep net	Individuals mean
Yellow traps		0,0001	5,6 e-08	8,8 e-09	1,78e-08	7,5
Stem tap	0,178		0,017	0,024	0,083	0,07
Nymphs per flushes	0,249	0,110		1,50e-28	0,236	9,64
Eggs per flushes	0,264	0,104	0,485		0,069	6,41
Sweep net	0,311	0,098	0,067	0,102	0	0,286
Dibulla, La Guajira						
Correlación \ p n=688	Yellow traps	Stem tap	Nymphs on flushes	Eggs on flushes		Individuals mean
Yellow traps		0,80	4,5 e-06	0,0023		0,42
Stem tap	0,009		0,97	0,916		0,006
Nymphs per flushes	0,173	-0,001		7,39e-16		1,24
Eggs per flushes	0,115	-0,004	0,30			1,65

It is recommended that for weekly monitoring, one of the three methods of adult and immature flush shoot inspection be used. In the case of tapping + shoot inspection, the costs would be 715,000 per year (13,750 per week). for sweep net + shoot inspection would be 800,000 (15,384 weekly), and for yellow sticky traps + shoot inspection, 1,016,000 per year (19,538 weekly). Although these costs will decrease significantly if sampling methodologies for *D. citri* are included in orchards where phytosanitary monitoring is already carried out on a weekly basis, because some materials are also used to monitor other arthropod pests and the time spent moving within the orchard would be the same, with optimization of personnel, time, and materials. It is important to emphasize that the samples in any of the methods must be well distributed and traps must be placed both inside and at the edge of the orchard due to the differences detected between plots of 0.2 ha.

In conclusion, the yellow sticky trap sampling method shows the highest sensitivity, and in times of low or no presence of shoots, is the best option for estimating the adult population of *D. citri* using 3 to 5 traps per 2 ha plot. This method can be easily adopted by the farmer or extensionists with prior training in the recognition and identification of *D. citri* adults and its costs are comparable to the other monitoring methods. The orientation of the traps is relevant in some cases and should consider possible sources of psyllid infestation as well as the prevailing wind direction.

The percentage of infestation in shoots is an easy sampling method to evaluate the population of immature *D. citri*. For a representative sampling, it is recommended to evaluate 45 to 55 shoots well distributed in the 2-ha plot.

For weekly monitoring, it is recommended to implement one of the three adult sampling methods, preferably yellow sticky traps and inspecting immature shoots, in addition to phytosanitary sampling for other citrus arthropod pests.

Acknowledgments. The authors are grateful to the Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural MADR and Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria AGROSAVIA for financing the execution of the project of research: "Technologies for the integrated management of the *Diaphorina citri* - HLB pathosystem in citrus crops in Colombia" (ID 1001723/TV 21), from which this article was derived. **Conflict of interests:** The manuscript was prepared and reviewed with the participation of all authors, who declare that there is no conflict of interest that could affect the validity of the results presented. **Authors contribution:** All authors participated in sample collection and processing, data analysis and writing of the final manuscript. JMM, LPA and MPF, also participated in the trial design.

REFERENCES

ACHOR, D.; WELKER, S.; BEN-MAHMOUD, S.; WANG, C.; FOLIMONOVA, S.Y.; DUTT, M.; GOWDA, S.; LEVY, A. 2020. Dynamics of *Candidatus Liberibacter asiaticus* movement and sieve-pore plugging in

citrus sink cells. *Plant Physiology*. 182(2):882-891. <https://doi.org/10.1104/pp.19.01391>

ÁLVAREZ-RAMOS, R.; AZUARA-DOMÍNGUEZ, A.; RODRÍGUEZ-CASTRO, J.H.; ZAVALA-ZAPATA, V.; SÁNCHEZ-BORJA, M.; VARGAS-TOVAR, J.A. 2022. Seasonal abundance of *Diaphorina citri* associated with the phenology of citrus crops. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*. 13(1): 89-101. <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i1.2494>

ANTOLÍNEZ, C.A.; MARTINI, X.; STELINSKI, LL.; RIVERA, M.J. 2022. Wind speed and direction drive assisted dispersal of asian citrus psyllid. *Environmental Entomology*. 51(2):305-312. <https://doi.org/10.1093/ee/nvab140>

BOTERO, V.; OCHOA, A.; GASTÓN, J.Z.; ORTIZ, R.A.; FUEL, S.M.; MONÁ, F.E.; MARCELA, M.L.; GUARIN, H.J.; ORDUZ, R.J.O.; CHAPARRO, Z.H.N.; ARÉVALO, P.E. 2014. *Diaphorina citri*. Identificación de la dinámica poblacional de *Diaphorina citri* (Hemiptera: Liviidae) en los cultivos de cítricos de Colombia: una herramienta para implementar un sistema piloto de seguimiento de poblaciones del insecto vector del HLB. Universidad Nacional de Colombia, Instituto Colombiano Agropecuario, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, Asociación Hortifrutícola de Colombia, Fondo Nacional de Fomento Hortifrutícola. Colombia. 88p.

BOUVET, J.P.; HOCHMAIER, V. 2020. Monitoreo y manejo del psílido asiático, vector de la enfermedad del HLB. INTA. Argentina. 21p.

COSTA, G.V.; NEVES, C.S.; BASSANEZI, R.B.; LEITE JUNIOR, R.P.; TELLES, T.S. 2021. Economic impact of Huanglongbing on orange production. *Revista Brasileira de Fruticultura*. 43(3):1-10. <https://doi.org/10.1590/0100-29452021472>

DALA-PAULA, B.M.; PLOTTO, A.; BAI, J.; MANTHEY, J.A.; BALDWIN, E.A.; FERRAREZI, R.S.; GLORIA, M.B. 2019. Effect of huanglongbing or greening disease on orange juice quality, a review. *Frontiers in Plant Science*. 9:1-10. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01976>

DÍAZ-PADILLA, G.; LÓPEZ-ARROYO, J.I.; GUAJARDO-PANES, R.A.; SÁNCHEZ-COHEN, I. 2021. Spatial distribution and development of sequential sampling plans for *Diaphorina citri* Kuwayama (Hemiptera: Liviidae). *Agronomy*. 11(7):1434. <https://doi.org/10.3390/agronomy11071434>

HALL, D.G.; HENTZ, M.G.; CIOMPERLIK, M.A. 2007. A comparison of traps and stem tap sampling for monitoring adult Asian citrus psyllid (Hemiptera: Psyllidae) in citrus. *Florida Entomologist*. 90(2):327-34. [https://doi.org/10.1653/0015-4040\(2007\)90\[327:ACOTAS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1653/0015-4040(2007)90[327:ACOTAS]2.0.CO;2)

- HALL, D.G. 2009. An assessment of yellow sticky card traps as indicators of the abundance of adult *Diaphorina citri* (Hemiptera: Psyllidae) in citrus. *Journal of Economic Entomology*. 102(1):446-452. <https://doi.org/10.1603/029.102.0158>
- INSTITUTO COLOMBIANO AGROPECUARIO-ICA. 2017. Resolución 7109. Diario Oficial No. 50.262 de 12 de junio de 2017. Disponible en internet en: <https://faolex.fao.org/docs/pdf/col170751.pdf>
- INSTITUTO COLOMBIANO AGROPECUARIO-ICA. 2023. Resolución 8640. Disponible en internet en: <https://acortar.link/bAXSh4>
- JOHNSTON, N.; STELINSKI, L.L.; STANSKY, P. 2019. Dispersal patterns of *Diaphorina citri* (Kuwayama) (Hemiptera: Liviidae) as influenced by citrus grove management and abiotic factors. *Florida Entomologist*. 102(1):168-173. <https://doi.org/10.1653/024.102.0127>
- LEONG, S.S.; LEONG, S.C.; BEATTIE, G.A. 2019. Dispersion pattern and sampling plan for Asian citrus psyllid, *Diaphorina citri* Kuwayama (Hemiptera: Psyllidae) in a citrus orchard. *Serangga*. 24:25-40.
- MIRANDA, M.P.; DOS SANTOS, F.L.; BASSANEZI, R.B.; MONTESINO, L.H.; BARBOSA, J.C.; SÉTAMOU, M. 2017. Monitoring methods for *Diaphorina citri* Kuwayama (Hemiptera: Liviidae) on citrus groves with different insecticide application programmes. *Journal of Applied Entomology*. 142(1-2):89-96. <https://doi.org/10.1111/jen.12412>
- MONZO, C.; AREVALO, H.A.; JONES, M.M.; VANACLOCHA, P.; CROXTON, S.D.; QURESHI, J.A.; STANSKY, P.A. 2015. Sampling methods for detection and monitoring of the Asian citrus psyllid (Hemiptera: Psyllidae). *Environmental Entomology*. 44(3):780-788. <https://doi.org/10.1093/ee/nvv032>
- MONZO, C.; STANSKY, P.A. 2017. Economic injury levels for Asian citrus psyllid control in process oranges from mature trees with high incidence of huanglongbing. *PLoS One*. 12(4):1-25. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0175333>
- OLIVERA-VARGAS, L.A.; GASPAR, Á.D.; CONTRERAS-MEDINA, D.I.; AGUILAR-RIVERA, N. 2020. Análisis de riesgo potencial de Huanglongbing a través de tecnología geoespacial en Colombia. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*. 21(3):1-23. https://doi.org/10.21930/rcta.vol21_num3_art:1552
- PARNELL, S.; CAMILLERI, M.; DIAKAKI, M.; SCHRADER, G.; VOS, S. 2019. Pest survey card on Huanglongbing and its vectors. EFSA Supporting Publications. 16(4):1-23. <https://doi.org/10.2903/sp.efsa.2019.EN-1574>
- SANTOS, O.; GUERRERO, M.; PALACINO, J. 2020. Bases para el manejo integrado de *Diaphorina citri* (Hemiptera: Liviidae): vector del HLB de los cítricos. ICA-ASOHOFrucol. Colombia. 19p.
- SÉTAMOU, M.; FLORES, D.; VICTOR, F.J.; HALL, D.G. 2008. Dispersion patterns and sampling plans for *Diaphorina citri* (Hemiptera: Psyllidae) in citrus. *Journal of Economic Entomology*. 101(4):1478-87. <https://doi.org/10.1093/jee/101.4.1478>
- SOUTHWOOD, T.R.; HENDERSON, P.A. 2000. Ecological methods. Third Edition. Blackwell. United Kingdom. 593p.
- STANSKY, P.A.; AREVALO, H.A.; QURESHI, J. 2010. Monitoring methods for Asian citrus psyllid. *Citrus Industry*. 91(4):20-22. <https://swfrec.ifas.ufl.edu/hlb/database/pdf/00001942.pdf>
- VARÓN-DEVIA, E.H.; FLÓREZ, C.M.; PÉREZ, L.; BARRIOS, C.J. 2020. Comparación de técnicas de muestreo para *Diaphorina citri* Kuwayama en cultivos de cítricos del Tolima, Colombia. *Revista de Protección Vegetal*. 35(3):1-11.

Comportamiento agronómico de cuarenta y un cruces interclonales de cacao (*Theobroma cacao* L.) en Ecuador

Agronomic behavior of forty-one interconnectional crosses of cocoa (*Theobroma cacao* L.) in Ecuador

Jaime Fabián Vera-Chang¹ ; Nataly Lorena Herrera-Tamayo² ; Ana Ruth Alvarez-Sanchez^{2,3} ;
Andry Annabel Alvarez-Aspiazu^{4*} ; Edison Geovanny Díaz-Camposano⁴ ; Luis Humberto Vásquez-Cortez⁵ 

¹Universidad Técnica Estatal de Quevedo. Facultad de Ciencias de la Industria y Producción, Grado en Ingeniería Alimentos, Maestría en Biotecnología Agropecuaria. Quevedo - Los Ríos, Ecuador; e-mail: jverac@uteq.edu.ec

²Universidad Técnica Estatal de Quevedo. Facultad de Postgrado, Master en Biotecnología Agropecuaria. Quevedo - Los Ríos, Ecuador; e-mail: herreratamayon@gmail.com

³Universidad Técnica Estatal de Quevedo. Facultad de Ciencias Pecuarías y Biológicas, Maestría en Biotecnología Agropecuaria. Quevedo - Los Ríos, Ecuador; e-mail: aalvarezs@uteq.edu.ec

⁴Universidad Técnica Estatal de Quevedo. Facultad de Ciencias de la Industria y Producción, Grado en Ingeniería en Alimentos. Quevedo - Los Ríos, Ecuador; e-mail: andryalvarezaspiazu@gmail.com; ediazc2@uteq.edu.ec

⁵Universidad Técnica de Babahoyo. Facultad de Ciencias Agropecuarias, Carrera de Agroindustria, Quevedo - Los Ríos, Ecuador; e-mail: lvasquezc@utb.edu.ec

*autor de correspondencia: andryalvarezaspiazu@gmail.com

Cómo citar: Vera-Chang, J.F.; Herrera-Tamayo, N.L.; Alvarez-Sanchez, A.R.; Alvarez-Aspiazu, A.A.; Díaz-Camposano, E.G.; Vásquez-Cortez, L.H. 2024. Comportamiento agronómico de cuarenta y un cruces interclonales de cacao (*Theobroma cacao* L.) en Ecuador. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 27(2):e2729. <http://doi.org/10.31910/rudca.v27.n2.2024.2729>

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 30 de 2024

Aceptado: diciembre 1 de 2024

Editado por: Helber Adrián Arévalo Maldonado

RESUMEN

La producción de cacao en Ecuador enfrenta dificultades para identificar clones que sean altamente productivos y que cumplan con los estándares internacionales de calidad física y sanitaria. Este tipo de estudios es crucial para Identificar clones con alto rendimiento y calidad, para mejorar la competitividad del cacao ecuatoriano, en el mercado global, razón, por la cual, esta investigación tuvo por objetivo evaluar el comportamiento agronómico de 41 cruces interclonales de cacao, para identificar materiales genéticos superiores. La investigación se realizó en la Finca Experimental “La Represa” en Los Ríos, Ecuador, utilizando un diseño completamente al azar, con 41 tratamientos y dos repeticiones. Se evaluaron variables productivas, sanitarias, de calidad física y la calidad del grano, mediante prueba de corte, clasificada según la norma INEN-17. En cuanto a los resultados, los tratamientos T2, T34 y T33 lograron los mayores índices productivos, aunque con costos elevados, por la mano de obra; en calidad física, el tratamiento T16 tuvo el mayor índice de semilla y T3 y T8 mostraron los valores más altos en espesor de lomo y espesor del surco, respectivamente. El tratamiento T31 alcanzó un 92,50 % de fermentación en la prueba de corte, clasificándose en la categoría ASSPS, la más alta, según la normativa.

Palabras claves: Características fitosanitarias; Calidad física; Comportamiento agronómico; Fitomejoramiento; Rendimiento.

ABSTRACT

Cacao production in Ecuador faces challenges in identifying clones that are highly productive and meet international standards for physical and sanitary quality. Such studies are crucial for identifying high-performance and quality clones to enhance the competitiveness of Ecuadorian cacao in the global market. The aim of this research was to evaluate the agronomic performance of 41 interclonal cacao crosses to identify superior genetic materials. The research was conducted at the “La Represa” Experimental Farm in Los Ríos, Ecuador, using a completely randomized design with 41 treatments and two replications. Productive variables, sanitary variables, physical quality, and grain quality through cutting test were evaluated, classified according to the INEN-176 standard. The results showed that treatments T2, T34, and T33 achieved the highest productivity indices, although with high labor costs. In terms of physical quality, treatment T16 had the highest seed index, while T3 and T8 had the highest values for lobe thickness and furrow thickness, respectively. Treatment T31 reached 92.50% fermentation in the cutting test, classifying in the ASSPS category, the highest according to the standard.

Keywords: Agronomic performance; Physical quality; Phytosanitary characteristics; Plant breeding; Yield.

INTRODUCCIÓN

La producción cacaotera en Ecuador es un pilar fundamental para el sector exportador (García Cruzatty *et al.* 2023; Lóor Zambrano *et al.* 2024; Morales-Rodríguez *et al.* 2024; Ramón Guanuche *et al.* 2024), destacándose como uno de los principales contribuyentes a la economía nacional (Villacis *et al.* 2022). Se estima que, aproximadamente, el 75 % del cacao exportado corresponde a la variedad de cacao fino de aroma (Erazo Solórzano *et al.* 2021), mientras que un gran porcentaje de las exportaciones restantes incluyen otras variedades, como el CCN51 (Boza *et al.* 2014). Este posicionamiento convierte a Ecuador en el país más competitivo de América Latina, en la producción y en la exportación de cacao (Camino-Mogro *et al.* 2016; Silva-Pérez *et al.* 2022).

En Ecuador, las variedades con el distintivo “sabor Arriba” son, generalmente, identificadas como materiales criollos, reconocidos por su calidad superior (Voigt *et al.* 2018); sin embargo, a pesar de estas clasificaciones generales, los comerciantes y los productores de cacao han mostrado un creciente interés en las subespecies e híbridos derivados de recientes programas de cruzamiento y de selección de semillas, debido a sus características particulares, que influyen directamente en el aroma y en el sabor del chocolate.

El problema central radica en la necesidad de identificar variedades de cacao que no solo mantengan un alto rendimiento productivo, sino que, también, ofrezcan resistencia a enfermedades comunes en el cultivo, como la Escoba de bruja (*Moniliophthora perniciosa*) y la Moniliasis (*Moniliophthora roreri*) (Tirado-Gallego *et al.* 2016; Ferrer-Sánchez *et al.* 2022). Esta situación subraya la importancia de realizar estudios que permitan seleccionar materiales genéticos superiores que optimicen, tanto la productividad como la calidad del cacao.

En virtud de lo anterior, esta investigación se centró en la evaluación de 41 cruces interclonales de cacao, con el objetivo de identificar aquellos con mejor desempeño agronómico y resistencia a enfermedades. Este estudio no solo busca contribuir al mejoramiento genético del cacao en Ecuador, sino, también, proporcionar a los cacaoteros variedades con alto potencial productivo y mayor sostenibilidad en el cultivo.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se llevó a cabo en la Finca Experimental “La Represa”, de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo (UTEQ), situada en el recinto Fanta, km 7,5 de la Vía Quevedo – San Carlos, provincia de Los Ríos. Sus coordenadas geográficas son 01°03’41” S y 79°25’15” O, localizada en una zona ecológica clasificada como bosque húmedo tropical, a una altura de 90 m s.n.m.

Se empleó un diseño completamente al azar (DCA), con cuarenta y un tratamientos, que correspondieron a cruces interclonales, pertenecientes al programa de cacao de la Unidad de Investigación Científica y Tecnológica de la UTEQ, más el testigo JHVH-10 (Tabla 1); cada tratamiento tuvo dos repeticiones y cada unidad experimental estuvo constituida por ocho plantas. El análisis

estadístico se realizó mediante el análisis de varianza ANOVA y las medias fueron comparadas mediante la prueba de la prueba de Tukey, con $p \leq 0,05$ de confiabilidad.

El análisis de varianza consideró tres fuentes de variación: tratamiento, error experimental y total. Para el tratamiento, la fórmula para los grados de libertad fue $t-1$, resultando en 40 grados de libertad. El error experimental se calculó con $t(r-1)$, lo que dio 41 grados de libertad. Finalmente, el total se obtuvo con $t*r-1$, sumando un total de 81 grados de libertad.

El modelo matemático fue:

$$Y_{ij} = \mu + T_i + E_{ij}$$

Donde: Y_{ij} = Valor de la variable respuesta i “ésimo” efecto de las observaciones; μ = Valor de la media general; T_i = Efecto de los tratamientos en estudio; E_{ij} = Error experimental o efecto aleatorio.

Las variables evaluadas en este estudio incluyeron varios aspectos del cacao. Primero, se registró el número de mazorcas sanas al cosechar, contando individualmente las mazorcas sanas por árbol en cada tratamiento (Guamán Villa *et al.* 2022). El rendimiento se calculó recolectando las mazorcas cosechadas y registrando el peso fresco de las almendras. Este peso fresco se multiplicó por 0,4 para obtener el peso seco, correspondiente en kg/ha/año (Jiménez Morejón *et al.* 2023). El número de mazorcas enfermas se contabilizó simultáneamente con las mazorcas sanas, contando las mazorcas enfermas por árbol de cada tratamiento (Guamán Villa *et al.* 2022).

Las variables de longitud, largo, ancho y espesor de lomo-surco se realizaron con pie de rey, a 20 almendras tomadas al azar por cada tratamiento; los valores de longitud se expresaron en centímetros (Andrade-Almeida *et al.* 2019). El índice de mazorca se refiere al número de mazorcas necesarias para obtener 1 kg de cacao seco, calculado con la fórmula: $IM = (\text{Número de mazorcas}) / (\text{Peso de las almendras secas de las mazorcas (g)} \times 1000)$ (Sánchez-Mora *et al.* 2014). El índice de semilla (g) se obtuvo tomando 300 semillas de mazorcas recolectadas, fermentadas y secas, calculando el IS, con la fórmula: $IS = (\text{Peso de 300 semillas fermentadas y secas (g)}) / 300$ (Sánchez-Mora *et al.* 2014).

El porcentaje de testa (%) se determinó pesando 10 almendras fermentadas y secas, descascarillando las almendras y pesando el cotiledón por separado. El porcentaje se calculó con: $\% \text{ de testa} = (\text{Peso de testa}) / (\text{Peso de 10 almendras}) \times 100$ (Jiménez *et al.* 2018). El porcentaje de fermentación (%) se registró mediante una prueba de corte siguiendo la norma ecuatoriana INEN 176, clasificando 100 almendras al azar en diferentes categorías, según su coloración: bien fermentadas, medianamente fermentadas, violetas, pizarras y con moho; los valores se expresaron en porcentajes. Las almendras se fermentaron en una caja micro fermentadora de madera de laurel de 1,57 m de largo y 0,75 m de ancho y el secado posterior se realizó en plástico negro, diferenciando los tratamientos (Morales Rodríguez *et al.* 2016).

Tabla 1. Descripción de los tratamientos de 41 cruces interclonales de cacao, evaluados en la Finca Experimental “La Represa”, de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo.

Nº	Código	Clones	Material genético
1	DICYT-H -272	LR17 X L46H88	Trinitario x Nacional
2	DICYT-H -273	LR17 X L12H27	Trinitario x Nacional
3	DICYT-H -274	CCN-51 XL46H75	Trinitario x Nacional
4	DICYT-H -275	LR18 X T19	Trinitario x Nacional
5	DICYT-H -276	CCN-51 X L46H57	Trinitario x Nacional
6	DICYT-H -277	CCN-51 X L49H98	Trinitario x Nacional
7	DICYT-H -278	LR17 X JHVH-10	Trinitario x Nacional
8	DICYT-H -279	CCN-51 X L4H98	Trinitario x Nacional
9	DICYT-H -280	CCN-51X L26H64l	Trinitario x Nacional
10	DICYT-H -281	CCN-51 X L26H64	Trinitario x Nacional
11	DICYT-H -282	LR14 X L12H27	Trinitario x Nacional
12	DICYT-H -283	LR14 X L46H67	Trinitario x Nacional
13	DICYT-H 284	LR20 X L12H27	Trinitario x Nacional
14	DICYT-H -285	LR20 X L40H49	Trinitario x Nacional
15	DICYT-H -286	LR20 X L8H12	Trinitario x Nacional
16	DICYT-H -287	LR18 X L12H37	Trinitario x Nacional
17	DICYT-H -288	LR18 X LN3H27	Trinitario x Nacional
18	DICYT-H -289	LR18 X L21H38	Trinitario x Nacional
19	DICYT-H -290	LR14 X L13H37	Trinitario x Nacional
20	DICYT-H -291	LR14 X L46H75	Trinitario x Nacional
21	DICYT-H -292	LR46H75 X LR14	Trinitario x Nacional
22	DICYT-H -293	LR20 X L40H66	Trinitario x Nacional
23	DICYT-H -294	LR15 X L20H43	Trinitario x Nacional
24	DICYT-H -295	LR16L11H18 X L19H43	Trinitario x Nacional x Nacional
25	DICYT-H -296	LR14 X LR16XL18H58	Trinitario x Nacional
26	DICYT-H -297	LR20H21XLR14X L18H58	Trinitario x Nacional x Nacional
27	DICYT-H -298	LR19 X L42H80	Trinitario x Nacional
28	DICYT-H -299	LR14XL26H64 X L46H66	Trinitario x Nacional
29	DICYT-H -300	LR20XH26XLR18X L49H98	Trinitario x Nacional
30	DICYT-H -301	LR19 X LR18XL26H69	Trinitario x Nacional x Nacional
31	DICYT-H -302	LR16D11H19 X L15H34	Trinitario x Nacional
32	DICYT-H -303	LR18L23H64	Trinitario x Nacional
33	DICYT-H -304	LR20 X LR16L18H58	Trinitario x Nacional
34	DICYT-H -305	LR20 (LR16) (EET-103)	Trinitario x Nacional
35	DICYT-H -306	LR14 X LR14L18H53	Trinitario x Nacional
36	DICYT-H -307	LR20 X LR17L11H19	Trinitario x Nacional
37	DICYT-H -308	LR17L11H19 X L8H12	Trinitario x Nacional
38	DICYT-H -309	LR17L11H19 X L32H72	Trinitario x Nacional
39	DICYT-H -310	LR19 X L12H27	Trinitario x Nacional
40	DICYT-H -311	L46H75 X LR20	Trinitario x Nacional
41	TESTIGO	JHVH-10	Trinitario

DICYT-H = Dirección de Investigación Científica y Tecnológica.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Número de mazorcas sanas. El análisis ANOVA reveló diferencias altamente significativas ($p \leq 0,01$) entre los tratamientos. El tratamiento T2 presentó el mayor valor, con 39 mazorcas sanas, seguido por T33, con 26 y T34, con 24 mazorcas. Los valores más bajos se observaron en los tratamientos T21, con 2 mazorcas y T30 y T40, ambos con 1 mazorca (Tabla 2). Estos resultados difieren significativamente de los reportados por Tarqui Freire *et al.* (2017), quienes, en un estudio de seis años, registraron un promedio de 71,33 mazorcas sanas. Asimismo, Escobar (2008) informó la obtención de 208 y 176 mazorcas sanas para los clones EET-103 y EET-544, respectivamente. Proaño Vincas *et al.* (2015), en un estudio de cuatro años, encontraron que los clones L29-H04, L26-H64, L46-H57 y L49-H98 presentaron promedios de 24, 21, 21 y 20 mazorcas sanas por planta, aunque con menor rendimiento.

Número de mazorcas enfermas. El análisis ANOVA mostró diferencias altamente significativas ($p \leq 0,01$), siendo el tratamiento T34 el que obtuvo el mayor promedio, con 35 mazorcas enfermas, seguido por T10 y T1, con un promedio de 23. Los valores más bajos fueron observados en el tratamiento T32, con 2 mazorcas enfermas y en el T11, con 1 (Tabla 2). Escobar (2008) reportó que el clon EET-62 presentó el menor número de mazorcas enfermas, con solo 2 frutos afectados, en un estudio de seis años. Por otro lado, los resultados actuales superan los reportados por Tarqui Freire *et al.* (2017), quienes observaron un promedio general de 4,19 mazorcas enfermas, en 21 genotipos. Maldonado Fuentes (2015) informó valores más bajos, con promedios de 5,64, para escoba de bruja y 8,35, para moniliasis.

Tabla 2. Promedios estadísticos de los factores productivos y sanitario presentes en 41 cruces interclonales de cacao, en la Finca Experimental La Represa, de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo.

Tratamientos		Número de mazorcas sanas		Número de mazorcas enfermas		Rendimiento (kg/ha/año)	
1	DICYT-H -272	20	abcd	23	ab	1903,15	ab
2	DICYT-H -273	39	a	19	ab	3699,63	a
3	DICYT-H -274	5	cd	13	ab	466,62	b
4	DICYT-H -275	6	bcd	6	b	524,95	b
5	DICYT-H -276	7	bcd	13	ab	583,28	b
6	DICYT-H -277	4	cd	16	ab	399,96	b
7	DICYT-H -278	6	bcd	6	b	499,95	b
8	DICYT-H -279	12	bcd	6	b	1266,54	b
9	DICYT-H -280	10	bcd	9	b	916,58	b
10	DICYT-H -281	10	bcd	23	ab	1083,23	b
11	DICYT-H -282	2	d	1	b	249,98	b
12	DICYT-H -283	8	bcd	3	b	866,58	b
13	DICYT-H 284	10	bcd	9	b	1149,89	b
14	DICYT-H -285	9	bcd	14	ab	933,24	b
15	DICYT-H -286	11	bcd	5	b	1366,53	b
16	DICYT-H -287	7	bcd	10	b	883,25	b
17	DICYT-H -288	9	bcd	7	b	939,91	b
18	DICYT-H -289	5	cd	8	b	533,28	b
19	DICYT-H -290	5	cd	8	b	466,62	b
20	DICYT-H -291	13	bcd	12	ab	1499,85	b
21	DICYT-H -292	2	d	5	b	166,65	b
22	DICYT-H -293	8	bcd	17	ab	716,60	b
23	DICYT-H -294	10	bcd	17	ab	883,25	b
24	DICYT-H -295	6	bcd	8	b	516,62	b
25	DICYT-H -296	5	cd	7	b	799,92	b
26	DICYT-H -297	12	bcd	14	ab	1183,22	b
27	DICYT-H -298	9	bcd	8	b	733,26	b
28	DICYT-H -299	15	bcd	11	ab	1133,22	b
29	DICYT-H- 300	5	cd	5	b	283,31	b

Continuación tabla 2.

30	DICYT-H -301	1	d	2	b	50,00	b
31	DICYT-H -302	7	bcd	2	b	799,92	b
32	DICYT-H -303	4	cd	2	b	359,97	b
33	DICYT-H -304	26	ab	13	ab	1853,15	ab
34	DICYT-H -305	24	abc	35	a	1853,15	ab
35	DICYT-H -306	9	bcd	8	b	733,26	b
36	DICYT-H -307	12	bcd	16	ab	1199,88	b
37	DICYT-H -308	9	bcd	13	ab	639,94	b
38	DICYT-H -309	7	bcd	14	ab	506,62	b
39	DICYT-H -310	15	bcd	20	ab	1013,23	b
40	DICYT-H -311	1	d	5	b	66,66	b
41	TESTIGO (JHVH-10)	7	bcd	7	b	493,28	b
Promedio		9,00		10,00		883,37	
CV(%)		22,41		23,52		30,71	

PF: peso fresco; Rend. Kg/ha/año: Rendimiento kilogramos/hectárea/año; CV (%): Coeficiente de variación; Max: valor máximo; Min: Valor mínimo. Medias con una letra común no son significativamente, según Tukey ($p \geq 0,05$).

Rendimiento (kg/ha/año). El análisis ANOVA indicó diferencias altamente significativas ($p \leq 0,01$) en el rendimiento entre los tratamientos. El tratamiento T2 obtuvo el mayor rendimiento, con 3699,63 kg/ha/año, seguido por T1, con 1903,15 kg/ha/año y los tratamientos T34 y T33, con 1853,15 kg/ha/año. Los menores rendimientos fueron registrados en T40, con 66,66 kg/ha/año y T30, con 50,00 kg/ha/año (Tabla 2). En comparación, Vera Chang & Goya Baquerizo (2015) reportaron rendimientos superiores en los híbridos DYRCYT-H-259 y DYRCYT-H-255, con 1558,18 y 1446,86 kg/ha/año, respectivamente, mientras que el híbrido JHVH-10 presentó el menor rendimiento, con 395,19 kg/ha/año. Proaño Víneces *et al.* (2015) documentaron rendimientos de hasta 1117,2 y 1043,3 kg/ha/año, en los clones L11-H19 y L26-H64, respectivamente, con el clon L29-H04, alcanzando 613,6 kg/ha/año. Sánchez-Mora *et al.* (2014) observaron que 97 de 100 clones evaluados presentaron rendimientos de cacao seco inferiores a 1000 kg/ha/año, con una media de 376,02 kg/ha/año.

En términos de productividad, los tratamientos T2, T1, T34 y T33 se destacaron por presentar el mayor número de mazorcas sanas y los mejores rendimientos (kg/ha/año), lo que sugiere que estos tratamientos podrían ser considerados como materiales de alto rendimiento para nuevas plantaciones.

Largo de almendra (cm). El ANOVA no mostró diferencias significativas ($p \geq 0,05$) (Tabla 3). Estos resultados son similares a los de Álvarez *et al.* (2007), quienes obtuvieron un promedio de 2,48 cm en granos fermentados en cajones de madera. Lares Amaíz *et al.* (2012) reportaron valores inferiores de 1,87 cm en granos frescos y hasta 1,71 cm en granos fermentados, secados al sol y tostados.

Ancho de almendra (cm). No se observaron diferencias significativas en el análisis ANOVA ($p \geq 0,05$) (Tabla 3). Álvarez *et al.* (2007) encontraron un promedio de 1,31 cm, mientras que Álvarez *et al.* (2010) obtuvieron resultados comparables a los actuales, con 1,34 cm en granos fermentados en cajones de madera y cestas plásticas.

Espesor de lomo (cm). El espesor de lomo presentó diferencias altamente significativas ($p \leq 0,01$), con el tratamiento T3, registrando el mayor valor de 2,40 cm, mientras que los tratamientos T33 y T27 mostraron los valores más bajos, con 1,17 cm y 1,14 cm, respectivamente (Tabla 3). Pérez García & Freile Almeida (2017) reportaron espesores de 1,70 cm y 1,71 cm en clones, como EET-103 y CCN-51. Pérez *et al.* (2002) indicaron espesores entre 0,02 cm y 0,31 cm.

Espesor de surco (cm). El análisis mostró diferencias altamente significativas ($p \leq 0,01$), con los valores más altos registrados en los tratamientos T8 y T2, con 1,59 cm y 1,58 cm, respectivamente y el valor más bajo en T24, con 0,65 cm (Tabla 3). Pérez *et al.* (2002) reportaron valores entre 0,05 cm y 0,34 cm, mientras que Pérez García & Freile Almeida (2017) registraron un espesor promedio de 1,20 cm en el clon EET-103, con una media general de 0,99 cm.

Índice de mazorca. No se observaron diferencias significativas en el índice de mazorca ($p \geq 0,05$) (Tabla 3). Vera Chang *et al.* (2014) encontraron un promedio de 21,95 g, con el clon DIRCYT-C129, mostrando el mayor índice (34,36 g). Graziani de Fariñas *et al.* (2002) reportaron valores de 30,77 g, 30,46 g y 24,10, g para diferentes tipos de cacao, mientras que Sánchez-Mora *et al.* (2014) observaron una media de 23,30 mazorcas, con índices entre 14,6 y 17,7.

Índice de semilla (g). El análisis mostró diferencias significativas ($p \leq 0,05$), siendo el tratamiento T16 el que presentó el mayor índice, con 1,73 g, seguido por T31, con 1,68 g, mientras que los menores índices correspondieron a T41 (Testigo), con 1,20 g y T40, con 0,65 g (Tabla 3). Solís Bonilla *et al.* (2015) reportaron un índice promedio de 0,77 g, mientras que Sánchez-Mora *et al.* (2014) encontraron índices entre 1,97 g y 1,62 g. Zambrano *et al.* (2010a) informaron un promedio de 1,45 g.

Porcentaje de testa (%). El análisis no reveló diferencias significativas ($p \geq 0,05$) (Tabla 3). Zambrano *et al.* (2010b) reportaron un porcentaje de cascarilla de hasta 13,5 % y Lares Amaíz *et al.* (2013)

indicaron una media de 15,5 0 %, en granos fermentados y secados al sol. Pérez *et al.* (2002) encontraron un porcentaje de testa de 14,16%, con muestras comerciales, alcanzando hasta un 15,33 %.

Tabla 3. Promedios estadísticos de los parámetros de calidad física de las almendras presentes en 41 cruces interclonales de cacao, en la Finca Experimental La Represa, de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo.

Tratamientos		LA		AA		EL		ES		IM		IS		PT (%)	
		cm													
1	DICYT-H -272	2,52	a	1,43	a	1,88	a	1,32	a	26,49	a	1,49	a	13,03	a
2	DICYT-H -273	2,61	a	1,31	a	1,49	a	1,58	a	23,91	a	1,46	a	17,86	a
3	DICYT-H -274	2,45	a	1,40	a	2,40	a	1,45	a	23,76	a	1,45	a	19,22	a
4	DICYT-H -275	2,58	a	1,35	a	1,94	a	1,20	a	17,23	a	1,52	a	9,22	a
5	DICYT-H -276	2,46	a	1,31	a	2,20	a	1,27	a	24,10	a	1,38	ab	11,54	a
6	DICYT-H -277	2,39	a	1,28	a	1,85	a	1,25	a	18,67	a	1,45	a	6,97	a
7	DICYT-H -278	2,60	a	1,38	a	1,77	a	1,25	a	17,50	a	1,30	ab	17,07	a
8	DICYT-H -279	2,47	a	1,31	a	2,17	a	1,59	a	18,11	a	1,26	ab	14,29	a
9	DICYT-H -280	2,40	a	1,37	a	1,60	ab	0,92	ab	18,64	a	1,38	ab	14,29	a
10	DICYT-H -281	2,48	a	1,40	a	2,00	a	1,17	a	18,01	a	1,48	a	15,63	a
11	DICYT-H -282	2,56	a	1,39	a	1,82	a	1,27	a	14,40	a	1,55	a	9,19	a
12	DICYT-H -283	2,54	a	1,33	a	1,47	a	0,97	ab	16,41	a	1,53	a	14,29	a
13	DICYT-H 284	2,48	a	1,36	a	1,84	a	1,15	a	30,51	a	1,45	a	10,63	a
14	DICYT-H -285	2,45	a	1,27	a	1,95	a	1,34	a	22,53	a	1,46	a	9,22	a
15	DICYT-H -286	2,49	a	1,33	a	1,62	ab	1,15	a	10,92	a	1,52	a	15,63	a
16	DICYT-H -287	2,77	a	1,54	a	1,97	a	1,27	a	11,61	a	1,73	a	10,72	a
17	DICYT-H -288	2,58	a	1,28	a	1,45	a	1,10	ab	16,56	a	1,66	a	12,92	a
18	DICYT-H -289	2,44	a	1,33	a	2,00	a	1,30	a	12,83	a	1,45	a	20,00	a
19	DICYT-H -290	2,57	a	1,53	a	1,40	a	1,07	ab	13,54	a	1,40	ab	13,89	a
20	DICYT-H -291	2,41	a	1,35	a	1,62	ab	0,95	ab	17,18	a	1,30	ab	11,31	a
21	DICYT-H -292	2,22	a	1,30	a	2,12	a	1,44	a	12,45	a	1,31	ab	11,26	a
22	DICYT-H -293	2,44	a	1,31	a	1,39	a	0,92	ab	18,69	a	1,33	ab	16,03	a
23	DICYT-H -294	2,55	a	1,25	a	1,82	a	1,10	ab	17,48	a	1,35	ab	11,26	a
24	DICYT-H -295	2,53	a	1,41	a	1,20	ab	0,65	ab	15,58	a	1,50	a	6,97	a
25	DICYT-H -296	2,58	a	1,47	a	1,53	a	1,05	ab	10,91	a	1,60	a	10,84	a
26	DICYT-H -297	2,60	a	1,37	a	1,55	a	1,00	ab	21,47	a	1,56	a	13,22	a
27	DICYT-H -298	2,37	a	1,35	a	1,14	ab	0,72	ab	23,28	a	1,34	ab	17,07	a
28	DICYT-H -299	2,46	a	1,25	a	1,59	a	0,95	ab	25,21	a	1,24	ab	16,09	a
29	DICYT-H- 300	2,66	a	1,57	a	1,95	a	1,32	a	26,02	a	1,48	a	10,24	a
30	DICYT-H -301	2,21	a	1,31	a	1,47	a	0,80	ab	34,02	a	1,35	ab	12,18	a
31	DICYT-H -302	2,52	a	1,36	a	1,33	ab	0,99	ab	13,74	a	1,68	a	12,13	a
32	DICYT-H -303	2,41	a	1,32	a	1,30	ab	0,70	ab	20,40	a	1,31	ab	13,34	a
33	DICYT-H -304	2,41	a	1,34	a	1,17	ab	0,67	ab	22,63	a	1,30	ab	11,31	a
34	DICYT-H -305	2,28	a	1,41	a	1,60	a	0,95	ab	20,08	a	1,55	a	10,48	a
35	DICYT-H -306	2,29	a	1,25	a	2,00	a	1,35	a	18,13	a	1,23	ab	11,69	a
36	DICYT-H -307	2,38	a	1,32	a	2,13	a	1,35	a	19,30	a	1,60	a	10,72	a
37	DICYT-H -308	2,53	a	1,35	a	1,74	a	1,14	a	29,66	a	1,46	a	11,26	a

Continuación tabla 3.

38	DICYT-H -309	2,67	a	1,47	a	1,53	a	0,95	ab	22,75	a	1,39	ab	14,84	a
39	DICYT-H -310	2,43	a	1,35	a	1,62	a	0,80	ab	22,17	a	1,45	a	12,18	a
40	DICYT-H -311	1,21	a	0,63	a	-----		-----		6,18	a	0,65	b	6,25	a
41	TESTIGO (JHVH-10)	2,49	a	1,35	a	1,53	a	0,98	ab	23,11	a	1,20	ab	15,71	a
	Promedio	2,45		1,34		1,66		1,08		19,42		1,42		12,73	
	CV(%)	11,79		12,43		19,83		24,22		17,99		13,24		20,48	
	Max	2,77		1,57		2,40		1,59		34,02		1,73		20,00	
	Min	1,21		0,63		0,00		0,00		6,18		0,65		6,25	

LA: Largo de la almendra; AA: Ancho de la almendra; EL: Espesor lomo; ES: Espesor surco; IM: Índice de mazorca; IS: Índice de semilla; PT: Porcentaje de testa; CV (%): Coeficiente de variación; Max: valor máximo; Min: Valor mínimo.

Medias con una letra común no son significativamente, según el test de Tukey ($p \geq 0,05$).

Fermentación total (%). El análisis ANOVA mostró diferencias altamente significativas ($p \leq 0,01$), en los porcentajes de fermentación total entre tratamientos. El tratamiento T31 registró el mayor porcentaje (92,50 %), seguido por T10, con 89,50 %. En contraste, T21 y T32 mostraron los porcentajes más bajos, con 30,50 % y 23,00 %, respectivamente (Tabla 4). Según la norma INEN-176, los tratamientos T3, T10, T31, T34 y T35 cumplieron con el requisito mínimo del 85 % de fermentación para cacao comercial, mientras que T2, T20, T21, T27, T30, T32 y T37 no alcanzaron los valores requeridos para cacao comercial.

Ortiz de Bertorelli *et al.* (2009) encontraron un aumento en la fermentación con el tiempo, alcanzando el 99,58 % en el día 5. Nogales *et al.* (2006) reportaron índices superiores al 90 % para granos fermentados por 5 días, similares a los valores actuales. Portillo *et al.* (2005) observaron un índice de 54,47 % en granos fermentados en cajón rectangular, mientras que Contreras *et al.* (2004) encontraron una media de 37,1 %, usando caja de madera, destacando la variabilidad en la humedad, según el tipo de fermentador.

Almendras bien fermentadas. El análisis estadístico mostró diferencias altamente significativas ($p \leq 0,01$), con el tratamiento T3, presentando el mayor número de almendras bien fermentadas (48), seguido por el T10, con 44 almendras. En contraste, el T21 no presentó almendras bien fermentadas (Tabla 4). Rivera Fernández *et al.* (2012) reportaron porcentajes promedio de 70 y 65 % en diferentes sistemas de fermentación, valores superiores a los obtenidos en este estudio. Quezada Ramón *et al.* (2017) documentaron un promedio de 45,05 %, comparable con los resultados actuales, pero inferior a los reportados por Rivera Fernández *et al.* (2012).

Almendras medianamente fermentadas. El análisis estadístico reveló diferencias altamente significativas ($p \leq 0,01$), con los tratamientos T36 y T29, mostrando las mayores cantidades de almendras medianamente fermentadas (76,00 y 75,50, respectivamente). Los valores más bajos correspondieron a los tratamientos T30 y T32, con 26,50 y 17,50 almendras medianamente fermentadas (Tabla 4).

Morales Rodríguez *et al.* (2016) reportaron un promedio de 37,25 % y Quezada Ramón *et al.* (2017), de 27,11%, ambos inferiores a los obtenidos en este estudio, pero dentro del rango establecido por la Norma INEN 176.

Almendras violetas. El análisis de varianza reveló diferencias significativas ($p \leq 0,05$), entre los tratamientos, con el T32 y el T30, registrando las mayores cantidades de almendras violetas (66,00 y 60,50, respectivamente). En cambio, los tratamientos T10 y T8 mostraron los valores más bajos (7,00 y 4,50) (Tabla 4). Rivera Fernández *et al.* (2012) encontraron que el porcentaje de almendras violetas disminuye con el tiempo de fermentación, en contraste con los resultados obtenidos en este estudio. Morales Rodríguez *et al.* (2016) reportaron un promedio de 27,17 %, similar a los resultados presentes.

Almendras pizarras. El análisis estadístico no mostró diferencias significativas ($p \geq 0,05$) (Tabla 4). Vera Chang & Goya Baquerizo (2015) reportaron una media de 0,93, sugiriendo que la fermentación no tuvo un efecto notable en esta variable. Ortiz de Bertorelli *et al.* (2009) documentaron una media de 8,00 %, cuando se realizaba una remoción frecuente cada 24 horas, mientras que Rivera Fernández *et al.* (2012) reportaron un 10 % de almendras pizarras, sin observar influencia del tiempo de fermentación ni del tipo de fermentador utilizado.

Almendras con presencia de moho. El análisis no reveló diferencias significativas ($p \geq 0,05$) (Tabla 4). Álvarez *et al.* (2010) y Morales Rodríguez *et al.* (2016) no reportaron moho en sus investigaciones, mientras que Guzmán Duque & Gómez Prada (2014) encontraron un promedio del 6,82 % de almendras afectadas por moho, en su estudio.

En la prueba de corte, los tratamientos T31, T10, T35, T34 y T3 presentaron los mayores porcentajes de fermentación, superando el 85 % y clasificándose dentro de la categoría ASSPS (Arriba Superior Summer Plantación Selecta). Los tratamientos T2, T34 y T33 destacaron por sus mejores rendimientos en cacao seco.

Tabla 4. Promedios estadísticos de la prueba de corte en almendras presentes en 41 cruces interclonales de cacao, en la Finca Experimental La Represa, de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo.

Tratamientos		FT (%)		ABF		AMF		AV		AP		Moho		Arriba
1	DICYT-H -272	66,00	ab	35,00	ab	31,00	ab	31,00	ab	2,50	a	0,50	a	ASS
2	DICYT-H -273	51,50	ab	21,50	ab	30,00	ab	35,50	ab	2,50	a	10,50	a	-----
3	DICYT-H -274	85,50	a	48,00	a	37,50	ab	11,50	ab	1,00	a	2,00	a	ASSPS
4	DICYT-H -275	71,00	ab	37,50	ab	33,50	ab	23,50	ab	1,00	a	4,50	a	ASS
5	DICYT-H -276	81,00	a	38,00	ab	43,00	ab	15,00	ab	2,50	a	1,50	a	ASSS
6	DICYT-H -277	55,50	ab	28,00	ab	27,50	ab	38,00	ab	5,00	a	1,50	a	ASN
7	DICYT-H -278	65,50	ab	34,00	ab	31,50	ab	30,50	ab	0,50	a	3,50	a	ASS
8	DICYT-H -279	81,50	a	40,50	ab	41,00	ab	4,50	ab	1,50	a	12,50	a	ASSS
9	DICYT-H -280	84,50	a	39,50	ab	45,00	ab	9,50	ab	0,00	a	6,00	a	ASSS
10	DICYT-H -281	89,50	a	44,00	ab	45,50	ab	7,00	ab	1,00	a	2,50	a	ASSPS
11	DICYT-H -282	68,00	ab	8,50	ab	59,50	ab	23,50	ab	8,50	a	0,00	a	ASS
12	DICYT-H -283	76,50	a	17,50	ab	59,00	ab	19,00	ab	3,50	a	1,00	a	ASSS
13	DICYT-H 284	69,00	ab	31,00	ab	38,00	ab	24,00	ab	3,50	a	3,50	a	ASS
14	DICYT-H -285	70,00	ab	17,50	ab	52,50	ab	22,50	ab	1,00	a	6,50	a	ASS
15	DICYT-H -286	68,00	ab	23,50	ab	44,50	ab	32,00	ab	0,00	a	0,00	a	ASS
16	DICYT-H -287	65,50	ab	24,50	ab	41,00	ab	29,50	ab	3,50	a	1,50	a	ASS
17	DICYT-H -288	60,00	ab	4,00	ab	56,00	ab	36,50	ab	1,00	a	2,50	a	ASN
18	DICYT-H -289	72,50	ab	14,00	ab	58,50	ab	25,00	ab	2,00	a	0,50	a	ASSS
19	DICYT-H -290	68,50	ab	16,00	ab	52,50	ab	31,00	ab	0,00	a	0,50	a	ASS
20	DICYT-H -291	50,50	ab	13,50	ab	37,00	ab	48,50	ab	1,00	a	0,00	a	-----
21	DICYT-H -292	30,50	ab	0,00	b	30,50	ab	8,50	ab	5,00	a	6,00	a	-----
22	DICYT-H -293	75,50	a	15,00	ab	60,50	ab	18,00	ab	3,50	a	3,00	a	ASSS
23	DICYT-H -294	75,50	a	7,00	ab	68,50	a	16,50	ab	5,50	a	2,50	a	ASSS
24	DICYT-H -295	64,50	ab	5,50	ab	59,00	ab	30,50	ab	1,00	a	4,00	a	ASN
25	DICYT-H -296	63,00	ab	4,50	ab	58,50	ab	28,00	ab	1,50	a	7,50	a	ASN
26	DICYT-H -297	66,50	ab	17,50	ab	49,00	ab	25,50	ab	6,00	a	2,00	a	ASS
27	DICYT-H -298	38,50	ab	3,00	b	35,50	ab	46,00	ab	15,00	a	0,50	a	-----
28	DICYT-H -299	83,00	a	9,50	ab	73,50	a	11,00	ab	1,50	a	4,50	a	ASSS
29	DICYT-H -300	80,00	a	4,50	ab	75,50	a	17,00	ab	2,00	a	1,00	a	ASSS
30	DICYT-H -301	32,50	ab	6,00	ab	26,50	ab	60,50	ab	0,50	a	1,00	a	-----
31	DICYT-H -302	92,50	a	36,00	ab	56,50	ab	7,50	ab	0,00	a	0,00	a	ASSPS
32	DICYT-H -303	23,00	ab	5,50	ab	17,50	ab	66,00	a	11,00	a	0,00	a	-----
33	DICYT-H -304	56,50	ab	29,00	ab	27,50	ab	35,00	ab	5,00	a	3,50	a	ASN
34	DICYT-H -305	86,00	a	29,00	ab	57,00	ab	8,00	ab	0,00	a	6,00	a	ASSPS
35	DICYT-H -306	87,50	a	13,50	ab	74,00	a	11,00	ab	1,50	a	0,00	a	ASSPS
36	DICYT-H -307	78,00	a	2,00	b	76,00	a	21,00	ab	0,50	a	0,50	a	ASSS
37	DICYT-H -308	45,00	ab	8,50	ab	36,50	ab	52,00	ab	2,50	a	0,50	a	-----
38	DICYT-H -309	57,50	ab	13,50	ab	44,00	ab	42,00	ab	0,50	a	0,00	a	ASN
39	DICYT-H -310	58,50	ab	3,00	b	55,50	ab	39,50	ab	1,50	a	0,50	a	ASN

Continuación tabla 4.

40	DICYT-H -311	----		----		-----		-----		-----		-----		-----
41	TESTIGO (JHVH-10)	57,00	ab	2,00	b	59,00	ab	33,00	ab	9,50	a	1,50	a	ASN
	Promedio	64,66		18,30		46,45		26,20		2,80		2,57		-----
	Max	92,50		48,00		76,00		66,00		15,00		12,50		-----
	Min	23,00		0,00		17,50		4,50		0,00		0,00		-----
	LI	59,64		14,83		42,17		22,09		1,83		1,62		-----
	LS	69,68		21,78		50,73		30,30		3,78		3,53		-----

FT: Fermentación total; ABF: Almendras bien fermentadas; AMF: Almendras medianamente fermentadas; AV: Almendras violetas; AP: Almendras pizarras; Moho: almendras con presencia de Moho; Max: valor máximo; Min: valor mínimo; LI: Límite inferior; LS: Límite superior. Medias con una letra común no son significativamente, según el test de Tukey ($p \geq 0,05$).

Este estudio revela que los tratamientos T2 (DICYT-H -273), T34 (DICYT-H -305) y T33 (DICYT-H -304), se destacan como los más prometedores, en cuanto a producción de mazorcas sanas y rendimientos de cacao seco por hectárea, posicionándose como materiales de alto rendimiento, que pueden ser utilizados en futuras plantaciones. Además, en términos de calidad física de la almendra, los tratamientos T3 (DICYT-H -274), T8 (DICYT-H -279) y T16 (DICYT-H -287) sobresalieron en características clave, como espesor de lomo, espesor de surco e índice de semilla, respectivamente. La prueba de corte confirmó que los tratamientos T31 (DICYT-H -302), T10 (DICYT-H -281), T35 (DICYT-H -306), T34 (DICYT-H -305) y T3 (DICYT-H -274) alcanzaron altos niveles de fermentación, superando el 85 %, requerido para la categoría ASSPS. En conjunto, estos tratamientos no solo ofrecen un rendimiento superior, sino, también, una excelente calidad física y de fermentación, lo que los convierte en opciones viables para mejorar la productividad y calidad del cacao.

Conflictos de intereses: El artículo fue redactado y revisado por todos los autores, quienes declaran que no existen conflictos de interés que pongan en riesgo la validez de los resultados presentados. **Contribución de los autores:** Jaime Fabián Vera Chang y Andry Annabel Alvarez Aspiazu realizaron la curaduría y el análisis formal de los datos para la escritura del borrador del manuscrito. Nataly Herrera Tamayo y Luis Vásquez contribuyeron con la investigación en campo y el manejo de recursos. Particularmente, Edison Geovanny Díaz Campozano y Ana Ruth Alvarez Sanchez lideraron la contextualización y la metodología del manuscrito. Todos los autores participaron en la redacción, la revisión, la edición del manuscrito y la versión final. **Financiación:** En este estudio no se contó con la financiación de alguna institución; sin embargo, agradecemos a la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, por el acceso a sus laboratorios, instalaciones y equipos, lo que hizo posible la realización de esta investigación.

REFERENCIAS

- ÁLVAREZ, C.; PÉREZ, E.; LARES, M. 2007. Caracterización física y química de almendras de cacao fermentadas, secas y tostadas cultivadas en la región de Cuyagua, estado Aragua. *Agronomía Tropical*. 57(4):249-256.
- ÁLVAREZ, C.; TOVAR, L.; GARCÍA, H.; MORILLO, F.; SÁNCHEZ, P.; GIRÓN, C.; DE FARIAS, A. 2010. Evaluación de la calidad comercial del grano de cacao (*Theobroma cacao* L.) usando dos tipos de fermentadores. *Revista Científica UDO Agrícola*. 10(1):76-87.
- ANDRADE-ALMEIDA, J.; RIVERA-GARCÍA, J.; CHIRE-FAJARDO, G.; UREÑA-PERALTA, M. 2019. Propiedades físicas y químicas de cultivares de cacao *Theobroma cacao* L. de Ecuador y Perú. *Enfoque UTE*. 10(4):1-12.
- BOZA, E.J.; MOTAMAYOR, J.C.; AMORES, F.M.; CEDENO-AMADOR, S.; TONDO, C.L.; LIVINGSTONE, D.S.; SCNELL, R.J.; 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>
- CAMINO-MOGRO, S.; ANDRADE-DÍAZ, V.; PESÁNTEZ-VILLACÍS, D. 2016. Posicionamiento y eficiencia del banano, cacao y flores del Ecuador en el mercado mundial. *Revista Ciencia UNEMI*. 9(19):48–53.
- CONTRERAS, C.; ORTIZ DE BERTORELLI, L.; GRAZIANI DE FARIÑAS, L.; PARRA, P. 2004. Fermentadores para cacao usados por los productores de la localidad de Cumboto, Venezuela. *Agronomía Tropical*. 54(2):219-232.

- ERAZO SOLÓRZANO, C.Y.; BRAVO FRANCO, K.J.; TUÁREZ GARCÍA, D.A.; FERNANDEZ ESCOBAR, Á.O.; TORRES NAVARRETE, Y.G.; VERA CHANG, J.F. 2021. Efecto de la fermentación de cacao (*Theobroma cacao* L.), variedad nacional y trinitario, en cajas de maderas no convencionales sobre la calidad física y sensorial del licor de cacao. *Revista de Investigación Talentos*. 8(2):42-55. <https://doi.org/10.33789/talentos.8.2.153>
- ESCOBAR, R. 2008. Comportamiento de seis clones de “cacao” (*Theobroma cacao* L.) en Guasaganda, provincia de Cotopaxi, Ecuador. *La Granja*. 7(1):9-12. <https://doi.org/10.17163/lgr.n7.2008.02>
- FERRER-SÁNCHEZ, Y.; MAFALDO-SAJAMI, A.A.; PLASENCIA-VÁZQUEZ, A.H.; URDÁNIGO-ZAMBRANO, J.P. 2022. Riesgo para el cultivo de cacao por los cambios en la distribución potencial del fitopatógeno *Moniliophthora perniciosa* bajo escenarios de cambio climático en Ecuador continental. *Terra Latinoamericana*. 40:1-10. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.1338>
- GARCIA CRUZATTY, L.; GARCÍA TALLEDO, B.; SÁNCHEZ MORA, F. 2023. Variability and combinatorial ability in fruit characters of new *Theobroma cacao* hybrids in Ecuador. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*. 18(3):e3265.
- GRAZIANI DE FARIÑAS, L.; ORTIZ DE BERTORELLI, L.; 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.
- GUAMÁN VILLA, M.A.; JARAMILLO AGUILAR, E.; BERNAL MORALES, J. 2022. Control biológico de la mazorca negra (*Phytophthora palmivora* L.) en el cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.). *Revista Metropolitana de Ciencias Aplicadas*. 5(3):149-154.
- GUZMÁN DUQUE, J.A.; GÓMEZ PRADA, S.L. 2014. Evaluación sensorial de cacao (*Theobroma cacao* L.) cultivado en la región del sur del departamento de Bolívar (Colombia). *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*. 5(2):221-236.
- JIMÉNEZ MOREJÓN, E.I.; SANTANA ARAGONE, D.X.; CARTAGENA FAYTONG, M.I.; RIVERA REYES, R.R.; BUSTAMANTE INTRIAGO, A. 2023. Bioestimulantes orgánicos en el cultivo del cacao (*Theobroma cacao* L.). *Conocimiento Global*. 8(2):1-17. <https://doi.org/10.70165/cglobal.v8i2.308>
- JIMÉNEZ, J.C.; TUZ GUNCAY, I.G.; QUEVEDO GUERREO, J.N.; GARCÍA BATISTA, R.M. 2018. Presecado: Su efecto sobre la calidad sensorial del licor de cacao (*Theobroma cacao* L.). *Revista Científica Agroecosistemas*. 6(2):63-73.
- LARES AMAÍZ, M.; PÉREZ SIRA, E.; ÁLVAREZ FERNÁNDEZ, C.; PEROZO GONZÁLEZ, J.; EL KHORI, S. 2013. Cambios de las propiedades físico-químicas y perfil de ácidos grasos en cacao de Chuao, durante el beneficio. *Agronomía Tropical*. 63(1-2):37-47.
- LARES AMAÍZ, M.D.C.; GUTIÉRREZ, R.; PÉREZ, E.; ÁLVAREZ, C. 2012. Efecto del tostado sobre las propiedades físicas, fisicoquímicas, composición proximal y perfil de ácidos grasos de la manteca de granos de cacao del estado Miranda, Venezuela. *Revista Científica UDO Agrícola*. 12(2):439-446.
- LOOR ZAMBRANO, H.Y.; FEIJÓ CUENCA, N.P.; FEIJÓ CUENCA, T.E.; NAVAS BAYONA, W.I. 2024. Comercialización de productos derivados de cacao en Manabí, Ecuador. *Universidad y Sociedad*. 16(1):302-312.
- MALDONADO FUENTES, C. 2015. Efecto del manejo en la reducción de incidencia de enfermedades (Moniliasis, Escoba de Bruja y Mazorca Negra) en el cultivo de Cacao (*Theobroma cacao* L.) en la Estación Experimental de Sapecho. *Revista Científica de Investigación INFO-INIAF*. 1(1):88-93.
- MORALES RODRÍGUEZ, W.J.; VALLEJO TORRES, C.A.; SINCHÉ BÓSQUEZ, P.D.; TORRES NAVARRETE, Y.G.; VERA CHANG, J.F.; ANZULES CEDENO, E.D. 2016. Mejoramiento de las características físico-químicas y sensoriales del cacao CCN51 a través de la adición de una enzima y levadura durante el proceso de fermentación. *Revista Amazónica Ciencia y Tecnología*. 5(2):169-181.
- MORALES-RODRÍGUEZ, W.J.; CARLOSAMA-MARTÍNEZ, J.M.; SINCHI RIVAS, C.A.; ALDERETE RENDON, J.; VALLEJO TORRES, C.A.; MORALES CEDENO, W. 2024. Calidad química del cacao (*Theobroma cacao* L.) tipo nacional de la parroquia Valle Hermoso – Ecuador. *Ciencia y Tecnología*. 17(1):38-49.
- NOGALES, J.; GRAZIANI DE FARIÑAS, L.; ORTIZ DE BERTORELLI, L. 2006. Cambios físicos y químicos durante el secado al sol del grano de cacao fermentado en dos diseños de cajones de madera. *Agronomía Tropical*, 56(1):5-20.
- ORTIZ DE BERTORELLI, L.; ROVEDAS, L.; GRAZIANI DE FARIÑAS, L. 2009. Influencia de varios factores sobre índices físicos del grano de cacao en fermentación. *Agronomía Tropical*. 59(1):81-88.
- PÉREZ GARCIA, G.A.; FREILE ALMEIDA, J.A. 2017. Adaptabilidad de clones promisorios de cacao nacional (*Theobroma cacao* L.), en el cantón Arosemena Tola de Ecuador. *Centro Agrícola*. 44(2):44-51.

- PÉREZ, E.E.; ÁLVAREZ, C.; LARES, M. 2002. Caracterización física y química de granos de cacao fermentados, secos y tostados de la región de Chuao. *Agronomía Tropical*. 52(2):161-172.
- PORTILLO, E.; GRAZIANI DE FARIÑAS, L.; BETANCOURT, E. 2005. Efecto de los Tratamientos post-cosecha sobre la Temperatura y el Índice de Fermentación en la calidad del cacao criollo Porcelana (*Theobroma cacao* L.) en el Sur del Lago de Maracaibo. *Revista de la Facultad de Agronomía*. 22(4):394-406.
- PROAÑO VINCES, O.; TORO GARCÍA, J.V.; COROZO QUINÓNEZ, L.; SÁNCHEZ-MORA, F.; MATUTE MATUTE, A.F.; VÁSQUEZ MORÁN, V.F. 2015. Potencial productivo de clones experimentales de cacao tipo "Nacional". *Revista La Técnica*. 14:24-29.
- QUEZADA RAMÓN, L.A.; QUEVEDO GUERRERO, J.N.; GARCÍA BATISTA, R.M. 2017. Determinación del efecto del grado de madurez de las mazorcas en la producción y calidad sensorial de (*Theobroma cacao* L.). *Revista Científica Agroecosistemas*. 5(1):36-46.
- RAMÓN GUANUCHE, R.E.; ERDEZOTO REINOSO, M.D.R.; ROMERO, D.J.; MELEÁN ROMERO, R.A. 2024. Análisis de las exportaciones cacaoteras en Sudamérica y su relación con Ecuador. *Uniandes EPISTEME*. 11(1):86-103.
- RIVERA FERNÁNDEZ, R.D.; MECÍAS GALLO, F.W.; GUZMÁN CEDEÑO, A.M.; PEÑA GALEAS, M.M.; MEDINA QUINTEROS, H.N.; CASANOVA FERRÍN, L.M.; BARRERA ÁLVAREZ, A.E.; NIVELA MORANTE, P.E. 2012. Efecto del tipo y tiempo de fermentación en la calidad física y química del cacao (*Theobroma cacao* L.) tipo Nacional. *Ciencia y Tecnología*. 5(1):7-12.
- SÁNCHEZ-MORA, F.; ZAMBRANO MONTUFAR, J.; VERA CHANG, J.; RAMOS REMACHE, R.; GÁRCES FIALLOS, F.; VÁSQUEZ MONTÚFAR, G. 2014. Productividad de clones de cacao tipo nacional en una zona del bosque húmedo tropical de la provincia de Los Ríos, Ecuador. *Revista Ciencia y Tecnología UTEQ*. 7(1):33-41.
- SILVA-PÉREZ, E.J.; GONZÁLEZ-RODRÍGUEZ, L.K.; MORÁN MURILLO, P.N. 2022. Exportaciones del cacao orgánico certificado de Ecuador: Análisis comparativo. *Revista Científica FIPCAEC*. 7(3):431-444. <https://doi.org/10.23857/fipcaec.v7i1>
- SOLÍS BONILLA, J.L.; ZAMARRIPA COLMENERO, A.; PECINA QUINTERO, V.; GARRIDO RAMÍREZ, E.; HERNÁNDEZ GÓMEZ, H. 2015. Evaluación agronómica de híbridos de cacao (*Theobroma cacao* L.) para selección de alto rendimiento y resistencia en campo a moniliasis. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*. 6(1):71-82.
- TARQUI FREIRE, O.M.; SOTOMAYOR CANTOS, I.A.; CASANOVA MENDOZA, T.D.J.; RODRÍGUEZ ZAMORA, G.A.; PLAZA AVELLÁN, L.F.; ZAMBRANO FLORES, F.G. 2017. Selección de genotipos de cacao (*Theobroma cacao* L.) con resistencia a escoba de bruja (*Moniliophthora perniciosa*) en Los Ríos, Ecuador. *Ciencia y Tecnología*. 10(1):17-26.
- TIRADO-GALLEGU, PA.; LOPERA-ÁLVAREZ, A.; RÍOS-OSORIO, L.A. 2016. Estrategias de control de *Moniliophthora roreri* y *Moniliophthora perniciosa* en *Theobroma cacao* L.: Revisión sistemática. *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria*. 17(3):417-430. https://doi.org/10.21930/rcta.vol17_num3_art:517
- VERA CHANG, J.; GOYA BAQUERIZO, A. 2015. Comportamiento agronómico, calidad física y sensorial de 21 líneas híbridas de cacao (*Theobroma cacao* L.). *Revista de las Agrociencias*. 15: 26-37.
- VERA CHANG, J.; VALLEJO TORRES, C.; PÁRRAGA MORÁN, D.; MORALES RODRÍGUEZ, W.; MACÍAS VÉLIZ, J.; RAMOS REMACHE, R. 2014. Atributos físicos-químicos y sensoriales de las almendras de quince clones de cacao nacional (*Theobroma cacao* L.) en el Ecuador. *Ciencia y Tecnología*. 7(2):21-34.
- VILLACIS, A.; ALWANG, J.; BARRERA, V. 2022. Cacao value chains and credence attributes: lessons from Ecuador. *Journal of Agribusiness in Developing and Emerging Economies*. 12(4):549-566. <https://doi.org/10.1108/JADEE-10-2021-0267>
- VOIGT, J.; TEXTORIS-TAUBE, K.; WÖSTEMEYER, J. 2018. pH-Dependency of the proteolytic formation of cocoa- and nutty-specific aroma precursors. *Food Chemistry*. 255:209-215. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.02.045>
- ZAMBRANO, A.; GÓMEZ, Á.; RAMOS, G.; ROMERO, C.; LACRUZ, C.; RIVAS, E. 2010a. Caracterización de parámetros físicos de calidad en almendras de cacao criollo, trinitario y forastero durante el proceso de secado. *Agronomía Tropical*. 60(4):389-396.
- ZAMBRANO, A.; ROMERO, C.; GÓMEZ, A.; RAMOS, G.; LACRUZ, C.; BRUNETTO, M.D.R.; MÁXIMO, G.; GUTIÉRREZ, L.; DELGADO, Y. 2010b. Evaluación química de precursores de aroma y sabor del cacao criollo merideño durante la fermentación en dos condiciones edafoclimáticas. *Agronomía Tropical*. 60(2):211-219.

Caracterización química, actividad bactericida y antioxidante de ácidos biliares presentes en la bilis de bovinos

Chemical characterization, bactericidal and antioxidant activity of bile acids present in the bile of bovines

Cristian Camargo-Pereira¹ ; Camilo Guzmán-Teran¹ ; Karina Causil-Espitia¹ ; Mary Cecilia Montaña-Castañeda² ; Alfonso Calderón-Rangel^{3*} 

¹Universidad de Córdoba, Facultad Ciencias de la Salud, Programa Regencia en Farmacia, Investigación de Fármacos y Afines-IDEFARMA. Montería-Córdoba, Colombia; e-mail: ccamargopereira01@correo.unicordoba.edu.co; cantonioguzman@correo.unicordoba.edu.co; kcausilespitia94@correo.unicordoba.edu.co

²Universidad Nacional de Colombia, sede Orinoquía, Unidad de Docencia y Formación. Arauca-Arauca, Colombia; e-mail: mmontanoc@unal.edu.co

³Universidad de Córdoba, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Instituto de Investigaciones Biológicas del Trópico-IIBT. Montería-Córdoba, Colombia; e-mail: acalderonr@correo.unicordoba.edu.co.

*autor de correspondencia: acalderonr@correo.unicordoba.edu.co

Cómo citar: Camargo-Pereira, C.; Guzmán-Teran, C.; Causil-Espitia, K.; Montaña-Castañeda, M.C.; Calderón-Rangel, A. 2024. Caracterización química, actividad bactericida y antioxidante de ácidos biliares presentes en la bilis de bovinos. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 27(2):e2488. <http://doi.org/10.31910/rudca.v27.n2.2024.2488>

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 24 de 2023

Aceptado: agosto 27 de 2024

Editado por: Helber Adrián Arévalo Maldonado

RESUMEN

Los ácidos biliares son biomoléculas con esqueleto esteroide presentes en la bilis animal y humana, sintetizada en el hígado, a partir de la descomposición del colesterol y luego metabolizados por el microbiota intestinal. Se les atribuyen propiedades biológicas, farmacológicas, anticancerígena, antimicrobiana y terapéuticas; también exhiben efectos bacteriostáticos y bactericidas afectando a géneros, como *Staphylococcus*, *Balantidium*, *Pneumococcus* y *Enterococcus*; sin embargo, hay pocos estudios con actividad antioxidante apreciable. Por lo tanto, se extrajeron e identificaron químicamente los ácidos biliares aislados de la bilis de bovino (Bos), para determinar su potencial antioxidante y bactericida. Los ácidos biliares fueron derivatizados como ésteres metílicos y analizados mediante cromatografía de gases, acoplada a espectrometría de masas. La actividad bactericida se evaluó frente a *Staphylococcus aureus* y *Pseudomonas aeruginosa* por el método de microdilución, con concentraciones entre 250 - 4000 µg/mL. El potencial antioxidante fue evaluado frente al radical libre 2,2-difenil-1-picrilhidracilo, a una concentración de 100 µg/mL. Los resultados mostraron la presencia de tres ácidos biliares: ácidos cólicos, ácido desoxicólico y ácido 7alfa-hidroxi-3-oxo-colan-24-oico. La inhibición del crecimiento bacteriano se alcanzó, en su totalidad, con los dos microorganismos evaluados, aún a la concentración más baja utilizada (250 µg/mL). La actividad antioxidante de los ácidos biliares frente al radical DPPH fue muy baja, presentándose un potencial de reducción

de 8,9 % a la concentración utilizada. Esta investigación permitió contribuir con el estudio de las actividades biológicas y químicas de los ácidos biliares.

Palabras claves: Colesterol; Cromatografía de gases; Espectrometría de masas; Esteres; Radical libre.

ABSTRACT

Bile acids, biomolecules with a steroidal skeleton present in animal and human bile, synthesized in the liver from the breakdown of cholesterol and then metabolized by the intestinal microbiota. Biological, pharmacological, anticancer, antimicrobial, and therapeutic properties are attributed to them; also exhibit bacteriostatic and bactericidal effects affecting genera such as *Staphylococcus*, *Balantidium*, *Pneumococcus*, and *Enterococcus*; however, there are few studies with appreciable antioxidant activity. Therefore, bile acids isolated from bovine bile (Bos) were extracted and chemically identified to determine their antioxidant and bactericidal potential. These were derivatized as methyl esters and analyzed by gas chromatography coupled to mass spectrometry. The bactericidal activity was evaluated against *Staphylococcus aureus* and *Pseudomonas aeruginosa* by the microdilution method, with concentrations between 250 - 4000 µg/mL. The antioxidant potential was evaluated against the free radical 2,2-diphenyl-

1-picrylhydrazyl, at a concentration of 100 µg/mL. The results showed the presence of three bile acids: cholic acids, deoxycholic acid, and 7alpha-hydroxy-3-oxo-cholan-24-oic acid. The inhibition of bacterial growth was fully achieved with the two microorganisms evaluated. The inhibition of bacterial growth was fully achieved with the two microorganisms evaluated, even at the lowest concentration used (250 µg/mL) and the antioxidant activity of bile acids against the DPPH radical was very low, presenting a reduction potential of 8.9 % at the concentration used. This research allowed us to contribute to the study of the biological and chemical activities of bile acids.

Keywords: Cholesterol; Esters; Free radical; Gas chromatography; Mass spectrometry.

INTRODUCCIÓN

La cadena bovina en el departamento de Córdoba participa con el 85,95 % de la cadena productiva agropecuaria del departamento (Gobernación de Córdoba, 2020). A pesar del valioso aporte socioeconómico que esta actividad tiene para la región, no se puede desconocer la problemática ambiental ante la falta de aprovechamiento de algunos subproductos que se generan del procesamiento de la carne (FAO & ADR, 2021). Dentro de estos, se encuentra la bilis, que se genera de los procesos metabólicos del hígado y contiene diferentes compuestos, como los ácidos biliares (Jaillier-Ramírez *et al.* 2021), con un potencial de uso farmacéutico e industrial (Sáyago-Ayerdi *et al.* 2008).

Los ácidos biliares son biomoléculas con un esqueleto esteroideal presentes en la bilis animal y humana, se sintetizan en el hígado, a partir de la descomposición del colesterol y luego son metabolizados por el microbiota intestinal. A estos compuestos se les atribuyen importantes propiedades biológicas y farmacológicas; asimismo, se han destacado por su actividad anticancerígena, antimicrobiana y por las propiedades terapéuticas de sus derivados, como agentes citotóxicos y neuroprotectores (Faustino *et al.* 2016; Mishra & Mishra, 2020; Navacchia *et al.* 2020). Estos compuestos exhiben efectos bacteriostáticos y bactericidas contra el microbiota al alterar sus membranas, afectando a géneros, como *Staphylococcus*, *Balantidium*, *Pneumococcus* y *Enterococcus* (Guzior & Quinn, 2021; An *et al.* 2022). Con relación a la actividad antioxidante, se reporta que los ácidos biliares conjugados con taurina presentan una actividad antioxidante apreciable y que los ácidos biliares al enlazarlos con otros tipos de compuestos adquieren potencial antioxidante (Singh & Bhattacharyya, 2016; Singh *et al.* 2017).

La finalidad que buscó este estudio fue abrir alternativas de impulso en la región y al país, a través del aprovechamiento de la bilis bovina proveniente del género *Bos*, mediante la extracción con solventes y separación de ácidos biliares, usando técnicas cromatográficas (cromatografía en capa fina) y la micro extracción en fase sólida (SPE); la identificación de los componentes mayoritarios, mediante cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (CG-EM) y la evaluación de la actividad bactericida, por el método de microdilución frente a las bacterias *Staphylococcus aureus* (Gram

positiva) y *Pseudomona aeruginosa* (Gram negativa) y de la actividad antioxidante frente al radical libre 2,2-difenil-1-picrilhidracilo (DPPH).

De esta manera, se busca presentar información preliminar sobre el análisis químico y el potencial bactericida y antioxidante de uno de los subproductos del sacrificio del ganado bovino generado en el departamento de Córdoba, con el propósito de motivar futuras investigaciones sobre el aprovechamiento de estos productos, considerados de desecho.

MATERIALES Y MÉTODOS

Recolección del material biológico. La muestra de bilis de ganado se recolectó durante el primer semestre del 2022, en Frigocer-Expocol S.A.S, frigorífico ubicado en el municipio de Cereté, localizado en el departamento de Córdoba. Se depositó en un galón plástico de polietileno de alta densidad, cerrado adecuadamente y se almacenó en una nevera con temperatura inferior a 5 °C. El estudio de la muestra fue realizado en el laboratorio de Investigación, Evaluación y Desarrollo de Fármacos y Afines (IDEFARMA), adscrito al departamento de Farmacia de la Universidad de Córdoba.

Extracción por solvente. La extracción de los ácidos biliares se realizó de acuerdo con Bonaldi (1993), donde se mezclaron 312 mL de bilis bovina y 120 mL de solución acuosa de hidróxido de sodio (30 % p/p); la mezcla se sometió a reflujo durante 20 horas, a temperatura 115 y 125 °C. Posteriormente, se enfrió y se extrajo con 200 mL de agua y acetato de etilo y se adicionó ácido sulfúrico al 35 % p/p, ajustando el pH a 4, aproximadamente, formándose dos fases: la acuosa, que se descartó, mientras que la fase orgánica se trató con 19 mL de una solución acuosa de cloruro de amonio al 10 % p/p, a una temperatura de 0 °C, formándose un precipitado que se filtró y se lavó con acetato de etilo; el producto húmedo se suspendió en 200 mL agua. Posteriormente, se adicionó 200 mL acetato de etilo, se calentó a 50 °C y se acidificó con ácido sulfúrico hasta pH 2, formando dos capas; la fase orgánica se trató con agua y se ajustó el pH en un rango de 8 a 9 con hidróxido de amonio; luego, se adicionaron 12 mL de solución acuosa de sulfato de magnesio al 17 % p/p; la mezcla se introdujo en un baño de hielo para alcanzar una temperatura de 0 °C, donde el producto se filtró y se lavó con acetato de etilo.

El producto húmedo del filtrado se suspendió en agua y acetato de etilo; posteriormente, se calentó y se acidificó con ácido sulfúrico formando dos capas, las cuales, se separaron. La fase acuosa se desechó, mientras que la fase orgánica se lavó con 100 mL de agua dos veces y se filtró, a través de carbón activado; la solución residual se dejó enfriar a 0°C. El sólido obtenido del paso anterior se filtró y se lavó con acetato de etilo y agua; por último, se realizó cromatografía de capa fina al sólido usando metanol como disolvente y un sistema de elución 70:20:10 Cloroformo: Acetona: MeOH y reactivo de Liebermann Bruchard como revelador.

Extracción por fase sólida (SPE). La extracción de ácidos biliares por SPE se realizó mediante columnas C18 HyperSep preactivada

y acondicionada con metanol (MeOH) y agua y se cargó en la columna un volumen de 1 mL de la muestra de bilis; se usaron tres sistemas de elución H₂O/MeOH (85:15), H₂O/MeOH (25:75) y AcEt/MeOH (85:15). El producto obtenido se secó con Na₂SO₄ y, por último, se efectuó cromatografía de capa fina, usando el mismo sistema de elución del paso anterior (Persson *et al.* 2007).

Obtención de ésteres metílicos de ácidos biliares. Para la obtención de ésteres metílicos de ácidos biliares se siguió el procedimiento descrito por Dayal *et al.* (1981), donde se tomaron 100 mg del producto obtenido por el método 1, para ser sometidos a la reacción de derivatización; mediante la adición de 3 mL de MeOH y 10 mg de ácido p-tolueno sulfónico, la solución fue colocada a reflujo durante dos horas y monitoreada por cromatografía de capa fina (TLC), usando un sistema 70:20:10 cloroformo: acetona: MeOH y reactivo de vainillina, como revelador. Se adicionó la mezcla de reacción gota a gota sobre hielo, manteniendo agitación; posteriormente, se evaporó el metanol y el residuo obtenido se lavó, con una solución diluida de bicarbonato sódico; se extrajo dos veces con 20 mL de acetato de etilo y se lavó con agua; después se evaporó hasta sequedad. El producto obtenido se adicionó a una mezcla acetona/acetato de etilo (90:10 v/v). El residuo tras la cristalización con acetona/acetato se monitoreo, mediante TLC.

Evaluación de la actividad antioxidante. Se preparó una solución madre de DPPH• disolviendo 18,8 mg DPPH•/ mL de MeOH y se dejó en oscuridad por 24 horas; posteriormente, se tomaron alícuotas de 1 mL, que se diluyeron con MeOH, hasta obtener una absorbancia ajustada de $0,30 \pm 0,5$ a $\lambda=517$ nanómetros (nm), usando MeOH como blanco. Para la evaluación de la actividad antioxidante se preparó una solución 100 ppm del extracto obtenido de ácidos biliares con dimetilsulfóxido (DMSO), de la cual, se tomaron 40 µL y se diluyeron en 1960 µL del radical DPPH• previamente preparado. El blanco de la muestra fue preparado adicionando 40 µL del tratamiento anterior y añadiendo 1960 µL de metanol. Como referencia se preparó una solución de 40 µL de DMSO y 1960 µL con la solución del radical (Pastrana *et al.* 2019).

Todos los tratamientos se hicieron por triplicado y todos los tubos se dejaron a oscuridad por 30 minutos; pasado este tiempo se procedió a medir la absorbancia. El promedio de los datos de absorbancia (A) se reemplazaron en la ecuación 1.

$$\% \text{ Inhibición} = \left[1 - \left(\frac{A_{\text{muestra}} - A_{\text{blanco}}}{A_{\text{referencia}}} \right) \right] * 100 \quad \text{ecuación 1}$$

Evaluación de la actividad bactericida. El ensayo de la actividad bactericida del extracto de ácido biliar se realizó, a través del método de microdilución en caldo (Contreras Martínez *et al.* 2022). Se emplearon cajas de microtitulación de 96 pozos, así: los aislamientos clínicos bacterianos, una bacteria Gram positiva (*Staphylococcus aureus*) y una bacteria Gram negativa (*Pseudomonas aeruginosa*). Para el ensayo, se realizó a partir de cultivos puros en agar soya-tripticasa y se estandarizó el inóculo bacteriano ($1-5 \times 10^8$ UFC/mL), empleando un espectrofotómetro Spectroquant^{MR} Prove a 630 nm. Se realizaron diluciones seriadas en caldo Mueller-Hinton, hasta obtener concentraciones finales de 250, 500, 1000,

2000 y 4000 µg/mL de los extractos a evaluar, en cada pozo de reacción. Los ensayos se desarrollaron con un volumen final de 200 µL por pozo (100 µL del inóculo microbiano y 100 µL del extracto). Microorganismos sin tratamiento fueron empleados como control de crecimiento (control negativo) y la ciprofloxacina (2 mg/mL), con propiedades antimicrobianas como control positivo, fueron empleados como controles positivos; las cajas fueron incubadas a 37 °C, durante 24 horas. Todos los experimentos fueron realizados por triplicado. Los resultados fueron expresados como porcentaje de reducción del crecimiento microbiano.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Extracción de ácidos biliares. La mezcla de ácidos biliares se obtuvo con rendimientos del 0,8 % utilizando extracción con solvente y del 0,9%, mediante la técnica de extracción en fase sólida (SPE). Estos bajos rendimientos se podrían atribuir a la composición específica de la bilis, que se compone, aproximadamente, de 86 % en agua; los ácidos biliares representan el 11,34 % de todo el contenido biliar, por esta razón, las extracciones que se realicen con volúmenes no excesivos tendrán rendimientos bajos (Sheriha *et al.* 1968; Kandrac *et al.* 2006).

Identificación de compuestos. El análisis por CG-EM de los ácidos biliares derivatizados como ésteres metílicos, mostró un cromatograma con varios picos (Figura 1), con tiempos de retención, comprendidos entre 13 y 23 minutos; en el cromatograma se destacan los compuestos del Ae1 al Ae5, siendo este último, el que se encuentra en mayor proporción. El cromatograma obtenido de la mezcla de ácidos biliares por SPE (Figura 2), no tuvo una distribución similar al cromatograma obtenido por extracción por solvente, debido, en gran manera, a que las condiciones que se usaron fueron distintas; se destacó el compuesto Ae6.

Elucidación del compuesto Ae5. En la figura 3 se muestra el espectro de masas del compuesto Ae5, donde se aprecia una señal en m/z (maza/carga) 422 generada por el ion molecular. Otros fragmentos generados que están en m/z: 404 (M⁺-H₂O), 386 (M⁺-H₂O) y 368 (M⁺-H₂O) e indican que este compuesto contiene hidróxidos que se eliminan en forma de agua. También, se pueden observar los fragmentos con valores de m/z: 353 (368-CH₃), m/z: 271 (pérdida de la cadena lateral) del anillo D, 253 (271-H₂O), 211 (fisión del anillo D), 199 (fisión del anillo A), 79 (fisión el anillo B), que sustentan claramente la presencia del núcleo esteroideal. Este núcleo esteroideal tiene una cadena lateral oxigenada, previamente determinada por la diferencia entre el valor de m/z 386 y el valor de m/z 271. Por medio de comparación en los patrones de fragmentación hallados en literatura, se permite proponer la estructura del colato de metilo de fórmula molecular C₂₅H₄₂O₅ (Tokes *et al.* 1968; Partridge & Djerassi, 1977; Valle Z. & Santafé P., 2009); para este compuesto, el patrón de fragmentación se muestra en la figura 4.

Elucidación del compuesto Ae1. En la figura 5 se muestra el espectro de masas del compuesto Ae1, con un ion de m/z de 404. Los fragmentos generados en m/z: 386 (M⁺-H₂O), indican que

este compuesto contiene hidróxido que se elimina en forma de agua. También, se pueden observar los fragmentos con valores de m/z : 371 ($M^+ - CH_3 + H_2O$), m/z : 353 ($M^+ - CH_3 + 2H_2O$), 271 (pérdida de la cadena lateral 115 $m/z + H_2O$), 253 ($M^+ - 271 - H_2O$), 211 (253-42), fragmentaciones que sustentan la presencia del núcleo esteroide similar a los dihidroxicolanoatos con cadena

lateral oxigenada, previamente determinada, por la diferencia entre el valor de m/z 386 y el valor de m/z 271. Por medio de consultas y comparaciones en la literatura, se propone la estructura del 7 α -hidroxi-3-oxo-5 β -colanoato de metilo, correspondiente con la fórmula molecular $C_{25}H_{40}O_4$ (Eneroth *et al.* 1966; Lawson & Setchell, 1988).

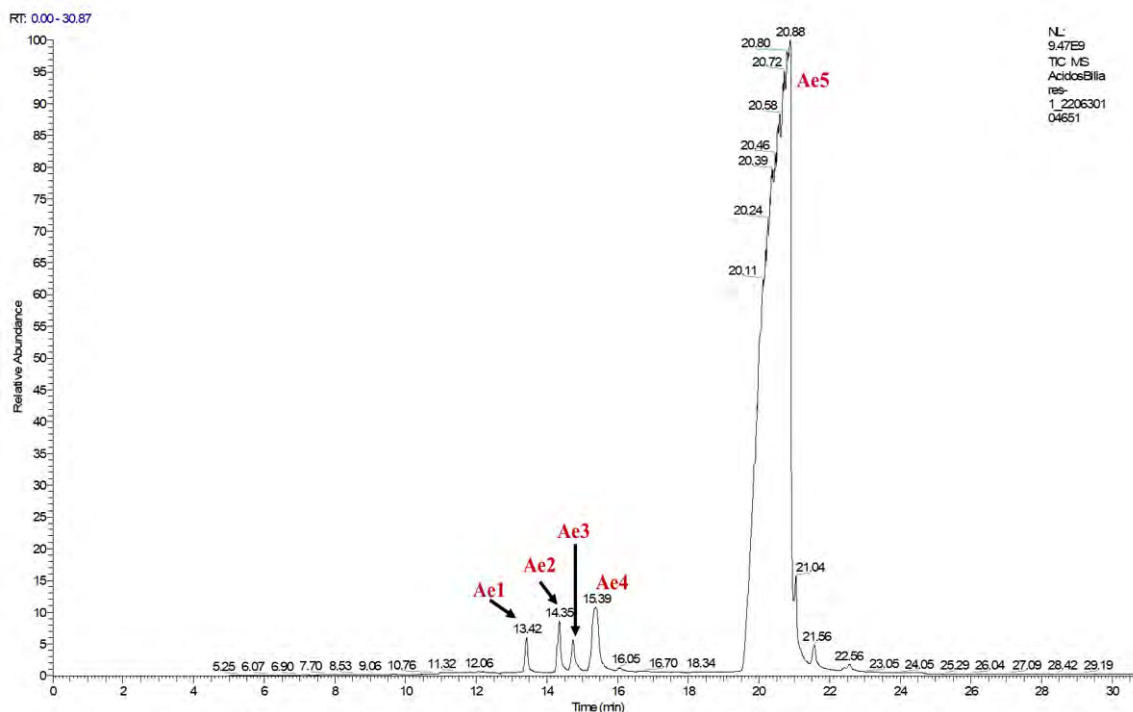


Figura 1. Cromatograma CG-MS del extracto obtenido por el método de extracción por solvente.

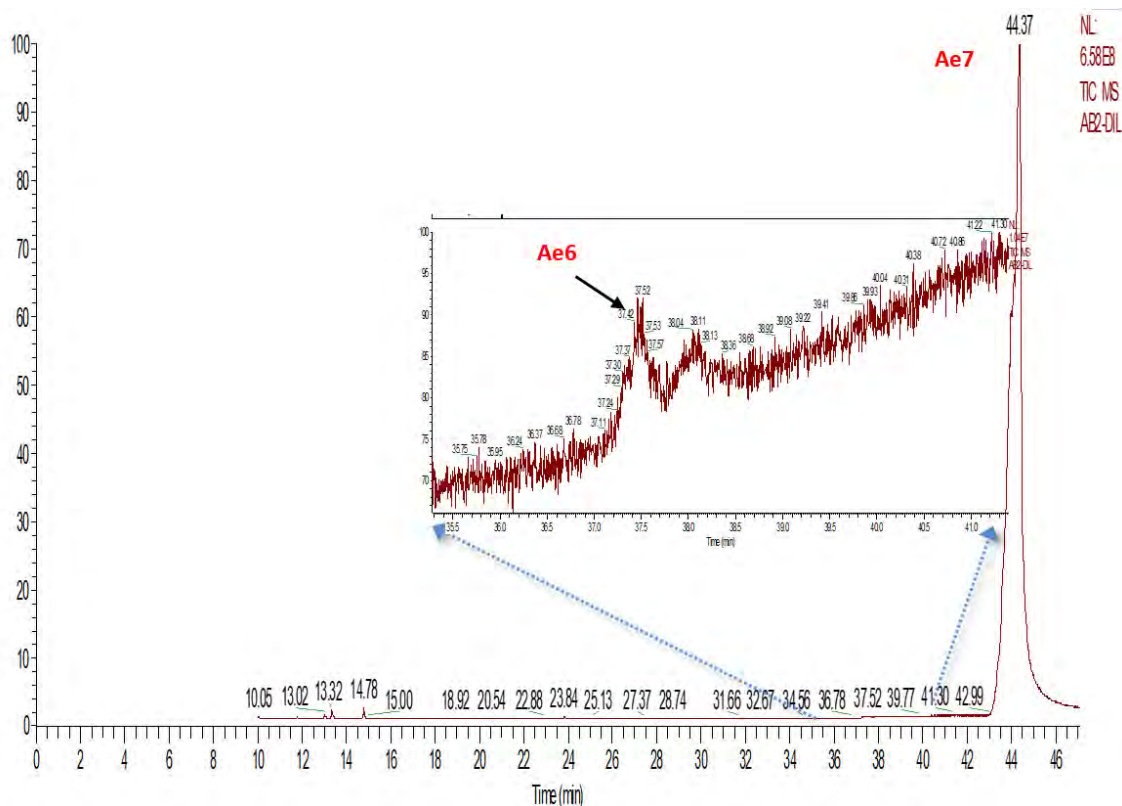


Figura 2. Cromatograma CG-MS del extracto obtenido por el método de extracción por SPE.

AcidosBiliares-1 220630104651 #4626 RT: 20.73 AV: 1 SB: 6662 6.16-19.36, 21.42-30.87 NL: 6.60E8
T: +c EI Full ms [50.00-700.00]

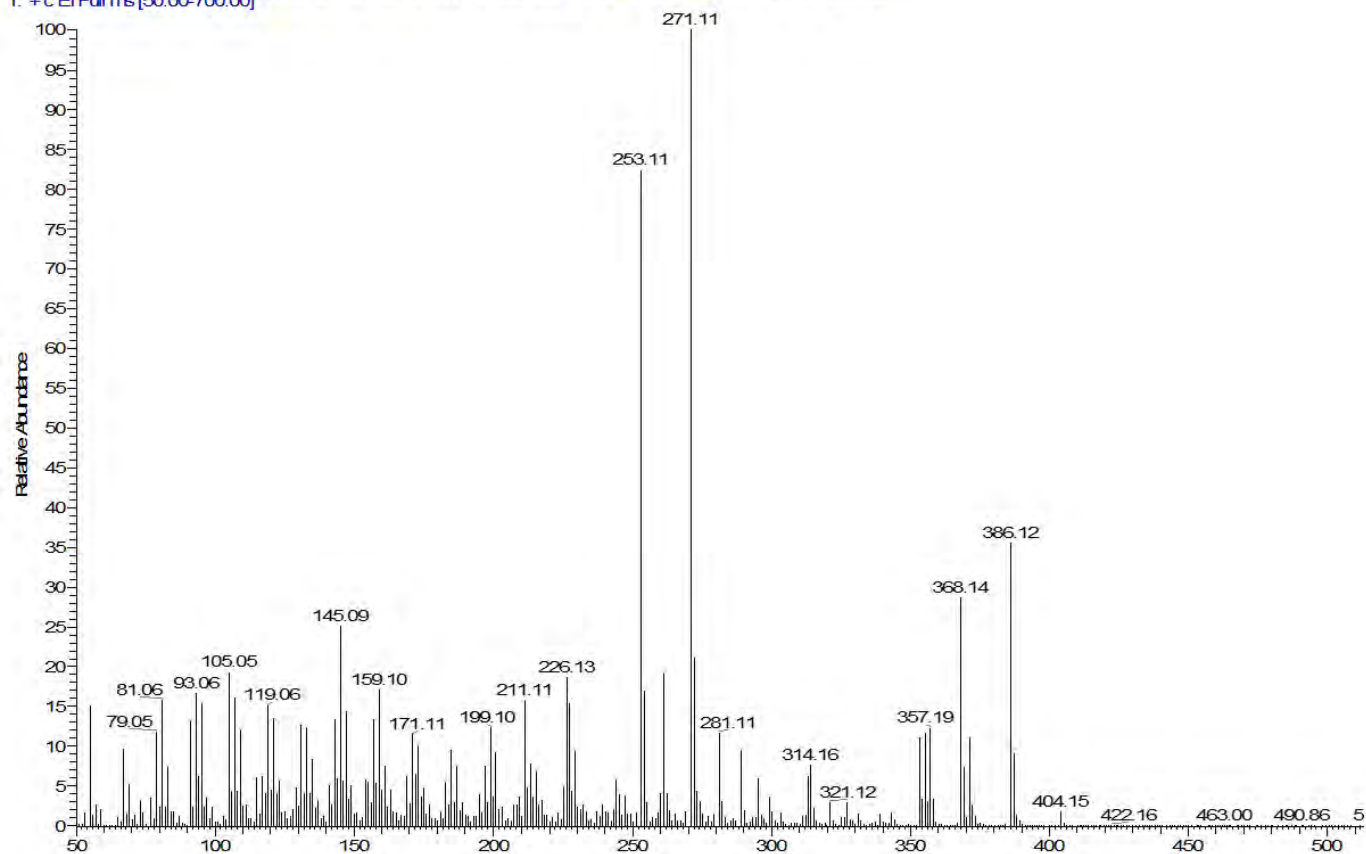


Figura 3. Espectro de masas determinado para el compuesto Ae5.

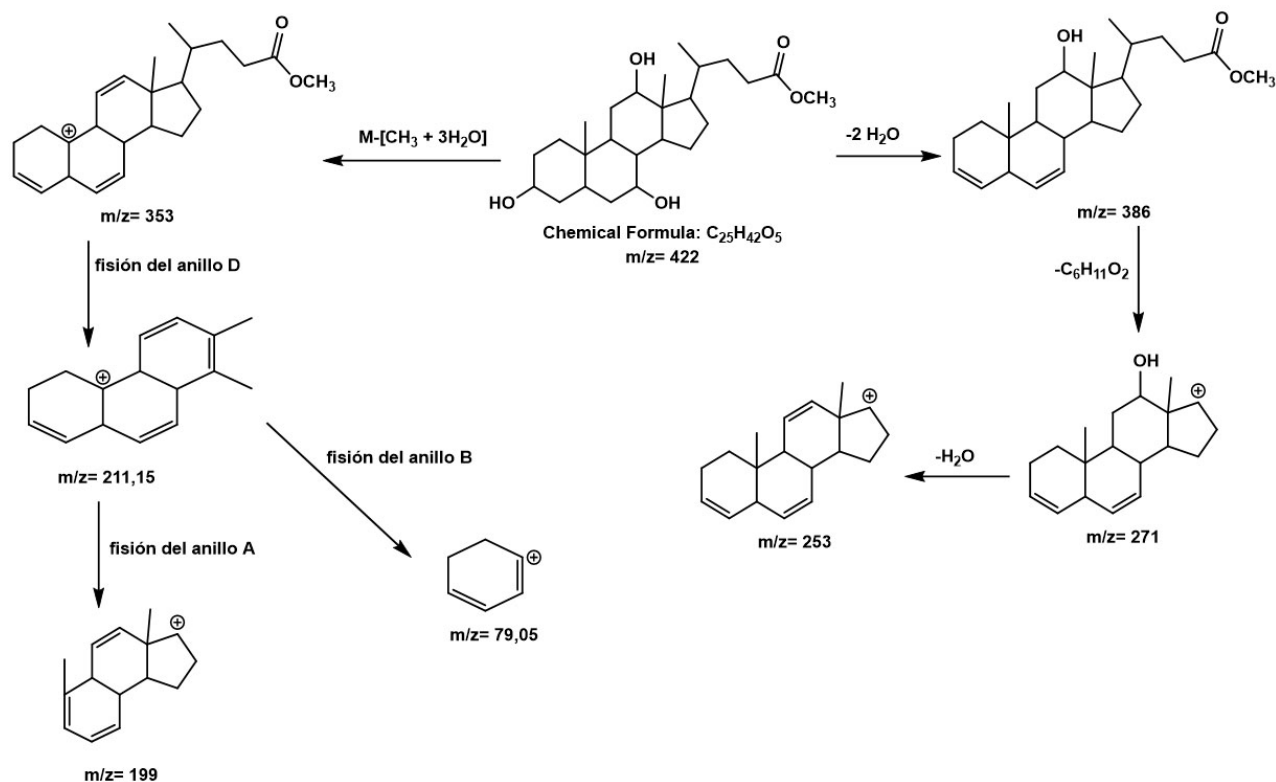


Figura 4. Fragmentación propuesta para el compuesto Ae5.

Elucidación del compuesto Ae6. Observando el espectro del compuesto (Figura 5), aunque no hay evidencia del pico ion molecular m/z 406, se presentan fragmentaciones características de esteroides hidroxilados (Martínez Martínez, 2002), donde se muestran fragmentos, que incluyen las pérdidas de dos moléculas de agua, $M-H_2O$, que corresponden a los picos m/z 388 y 370. El pico base m/z 255 se obtiene de la pérdida de la cadena lateral ($C_6H_{11}O_2$) del carbono 17 del anillo D; el pico m/z 273, el cual, es el segundo pico más abundante, se obtiene, de igual forma, por la pérdida de la cadena lateral del carbono 17 del anillo D ($C_6H_{11}O_2$) y la presencia de un grupo hidroxilo en el carbono doce. Este ácido biliar, perteneciente a la familia de los esteroides, presenta, además

en el espectro de masas, los fragmentos: M-metilo, como es la señal 355, que se da por la pérdida del metilo del grupo éster; de igual forma, la señal en 147 se debe al rompimiento de los enlaces del carbono ocho y el carbono once del anillo C, respectivamente, seguido de la pérdida M-metilo, ubicado en el carbono diez, generando un carbocatión. El pico m/z 73 [$C_3H_5O_2$]⁺ se forma por la ruptura heterolítica entre el carbono 22 y 23 de la cadena lateral unida al anillo D. Con base en las fragmentaciones encontradas y a los patrones de fragmentación hallados en literatura (Eneroth *et al.* 1966; Lawson & Setchell, 1988), se propone la estructura del desoxicolato de metilo, para este compuesto, en la figura 5.

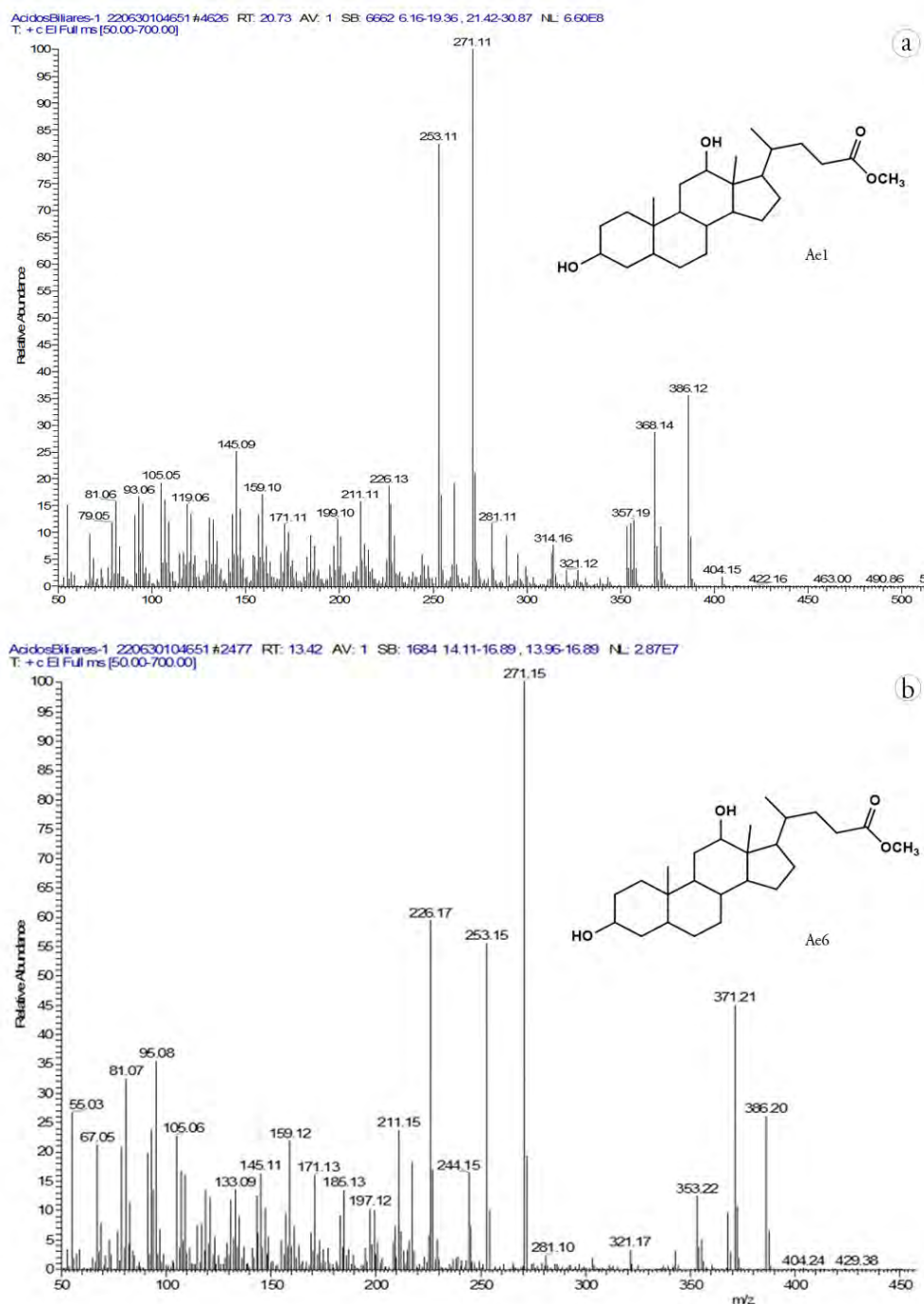


Figura 5. Espectros de masas y estructuras propuestas para los compuestos Ae1 y Ae6.

Evaluación de la actividad antioxidante. Al determinar la capacidad antioxidante de la mezcla de ácidos, mediante el método de DPPH•, a una concentración de 100 µg/mL, se observó que el porcentaje de inhibición del radical fue inferior al 10 %, por lo que se decidió no seguir trabajando la evaluación de la actividad antioxidante y solo se reportó una lectura de absorbancia, siendo para la muestra, el blanco y la solución de referencia, 0,288, 0,019 y 0,295, respectivamente. Con este resultado, se podría considerar que la mezcla de ácidos biliares no se encuentran presentes compuestos donadores de H que puedan estabilizar al radical DPPH•, siendo el compuesto mayoritario, en esta mezcla, el ácido cólico, que no presenta una estructura con dobles enlaces conjugados o anillos fenólicos en la molécula, por lo que el electrón desapareado no se podría deslocalizar, produciéndose una baja estabilidad de la especie radicalaria (Dupont *et al.* 2021). Estudios han demostrado que el ácido cólico, así como también otros ácidos biliares, como el ácido desoxicólico y el ácido litocólico, presentan actividad antioxidante,

cuando están enlazado con otro tipo de moléculas; tal es el caso de derivados de estilbenos (Dos Santos *et al.* 2015). Es importante mencionar que el ensayo de actividad antioxidante se realizó con la mezcla de ácidos biliares, obtenida por el método de extracción por solvente; por el método de SPE no se realizaron ensayos, porque al ser una microextracción, las cantidades obtenidas fueron muy bajas.

Evaluación de la actividad bactericida. Al evaluar la actividad antibacteriana por el método de microdilución en caldo, se observó una disminución en el crecimiento bacteriano de las dos cepas evaluadas, por parte de la mezcla de ácidos biliares. Los resultados obtenidos fueron expresados en porcentaje de reducción del crecimiento bacteriano del extracto de ácidos biliares frente a la bacteria Gram negativa (*P. aeruginosa*) y Gram positiva (*S. aureus*) y graficados, como se muestra en la figura 6.

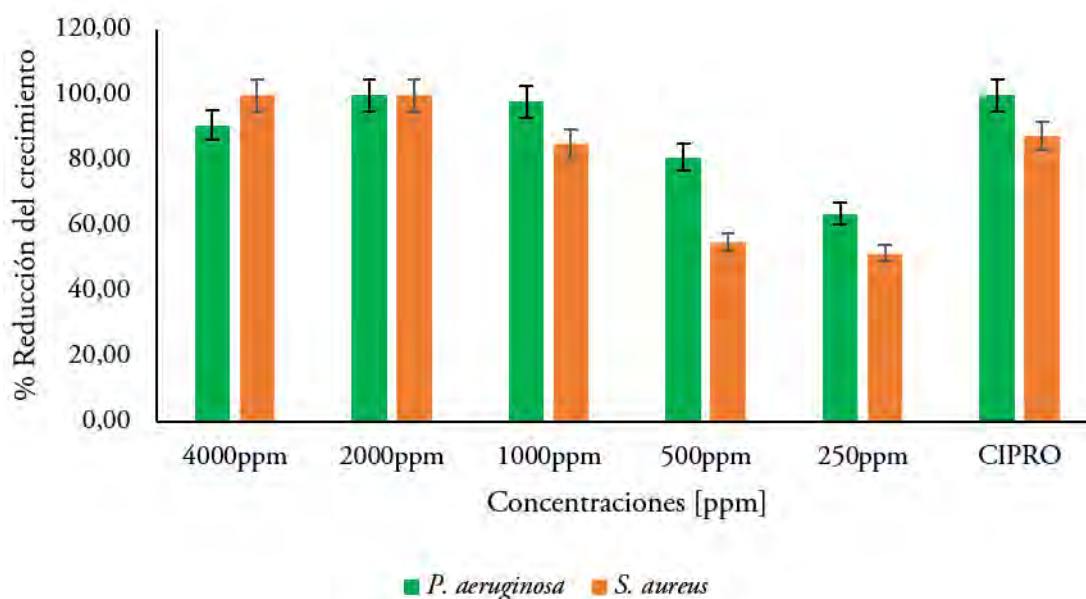


Figura 6. Porcentaje de inhibición del crecimiento bacteriano de *Pseudomonas aeruginosa* y *Staphylococcus aureus* en función de la concentración de la mezcla de ácidos biliares. CIPRO: control positivo de ciprofloxacina.

La mezcla de ácidos biliares mostró una prominente actividad antibacteriana contra los aislamientos clínicos probados en este estudio. Se pudo apreciar una inhibición del crecimiento de las bacterias tratadas con esta mezcla en comparación al control positivo de ciprofloxacina (CIPRO); respecto al control negativo, la reducción del crecimiento mostró diferencias significativas. Se observó una relación directamente proporcional entre el efecto inhibidor de crecimiento bacteriano y la concentración evaluada. Al realizar el análisis de varianza (ANOVA) y la prueba de Tukey a los datos de absorbancia registrados, se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos ($P > 0,05$), en cada una de las cepas utilizadas. Para *P. aeruginosa*, a partir de 1000 µg/mL, se consiguió una inhibición similar a la del antibiótico comercial ciprofloxacina, utilizado como control; incluso, con las concentraciones más bajas empleadas (250 y 500 µg/mL), la inhibición del crecimiento supera el 60 %, aunque no alcanzó a ser estadísticamente similar

al alcanzado con control positivo. Para *S. aureus* se observó un comportamiento similar entre los tratamientos, a partir de 1000 µg/mL y no se observaron diferencias significativas con los resultados registrados en el control positivo. A las concentraciones más bajas, el porcentaje de inhibición del crecimiento bacteriano estuvo por encima del 50 %.

La actividad bactericida de los ácidos biliares se relaciona, principalmente, a las propiedades detergentes que poseen y su capacidad para penetrar y romper las membranas (Di Gregorio *et al.* 2021). Los ácidos biliares disuelven los lípidos de la membrana y provocan la disociación de las proteínas integrales de la membrana; esta solubilización da como resultado la fuga del contenido celular y la muerte celular (Begley *et al.* 2005).

Se pudo determinar que los ácidos biliares no conjugados y ácidos biliares conjugados en concentraciones sub-inhedoras podían inhibir el crecimiento de *S. aureus*, así como también, demostraron que los ácidos biliares no conjugados poseen una acción antibacteriana más potente que los ácidos biliares conjugados (Sannasiddappa *et al.* 2017). Un estudio de actividad bactericida con dos patógenos, *Escherichia coli* y *Enterococcus faecalis*, demostró que los ácidos biliares tienen una inhibición significativa sobre el crecimiento de las bacterias evaluadas (Sung *et al.* 1993).

Se logró separar e identificar tres estructuras de esteres metílicos, siendo el colato de metilo el mayoritario, en el extracto de bilis estudiado. Las moléculas mostraron baja actividad antioxidante con un potencial de reducción inferior al 10 %; no obstante, los ácidos biliares esterificados presentaron alta actividad bactericida. La inhibición del crecimiento bacteriano se alcanzó en su totalidad con los microorganismos evaluados, aun a la concentración más baja utilizada (250 µg/mL). Esta investigación contribuye con el estudio de las actividades biológicas y químicas de los ácidos biliares y al aprovechamiento de los subproductos que se originan en el sacrificio bovino, en un frigorífico de Córdoba, Colombia.

Agradecimientos. A la señora Beatriz Muñoz, representante legal y administradora de la empresa Frigocer Expocol en Cereté (Córdoba), a Osmyth Díaz Castellar, director de calidad, por su colaboración y disposición para la ejecución de la propuesta de investigación. **Conflictos de intereses:** El artículo fue preparado y revisado con la participación de todos los autores, quienes declaramos que no existe conflicto de intereses que ponga en riesgo la validez de los resultados presentados. **Financiación:** Este estudio fue financiado con recursos públicos asignados por la Universidad de Córdoba, para la sostenibilidad de grupos de investigación código: FCS-01 - 22. **Contribución autores:** Todos los autores participaron en la escritura, la revisión y edición del manuscrito. Cristian Camargo y Karina Causil aportaron con la conceptualización y la metodología de la investigación; Mary Montaña, Camilo Guzmán y Alfonso Calderón trabajaron en la conceptualización, en la metodología, administración y supervisión del proyecto.

REFERENCIAS

- AN, C.; CHON, H.; KU, W.; EOM, S.; SEOK, M.; KIM, S.; LEE, J.; KIM, D.; LEE, S.; KOO, H.; CHO, H.; HAN, S.; MOON, J.; KANG, M.; RYU, K. 2022. Bile acids: Major regulator of the gut microbiome. *Microorganisms*. 10(9):1792. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10091792>
- BEGLEY, M.; GAHAN, C.G.M.; HILL, C. 2005. The interaction between bacteria and bile. *FEMS Microbiology Revista*. 29(4):625-651. <https://doi.org/10.1016/j.femsre.2004.09.003>
- BONALDI, A. 1993. Process for pharmaceutical grade high purity iodeoxycholic acid preparation (Patent No. 0564775A2). In European patent application. Disponible desde Internet en: <https://patentimages.storage.googleapis.com/6e/2f/d4/821df1af80b2ab/EP0564775A2.pdf>
- CONTRERAS MARTÍNEZ, O.I.; ANGULO ORTÍZ, A.; SANTAFÉ PATIÑO, G. 2022. Antibacterial screening of isoespintanol, an aromatic monoterpene isolated from *Oxandra xylopioides* diels. *Molecules*. 27(22):8004. <https://doi.org/10.3390/molecules27228004>
- DAYAL, B.; SPECK, J.; BAGAN, E.; TINT, G.S.; SALEN, G. 1981. p-Toluenesulfonic acid/methanol: Mild reagent for the preparation of bile acid methyl esters. *Steroids*. 37(2):239-242. [https://doi.org/10.1016/S0039-128X\(81\)80021-9](https://doi.org/10.1016/S0039-128X(81)80021-9)
- Di GREGORIO, M.C.; CAUTELA, J.; GALANTINI, L. 2021. Physiology and physical chemistry of bile acids. *International Journal of Molecular Science*. 22(4):1-23. <https://doi.org/10.3390/ijms22041780>
- DOS SANTOS, J.A.; POLONINI, H.C.; SUZUKI, É.Y.; RAPOSO, N.R.B.; DA SILVA, A.D. 2015. Synthesis of conjugated bile acids/azastilbenes as potential antioxidant and photoprotective agents. *Steroids*. 98:114-121. <https://doi.org/10.1016/j.steroids.2015.03.009>
- DUPONT, S.; FLEURAT-LESSARD, P.; CRUZ, R.G.; LAFARGE, C.; GRANGETEAU, C.; YAHOU, F.; GERBEAU-PISSOT, P.; ABRAHÃO JÚNIOR, O.; GERVAIS, P.; SIMON-PLAS, F.; CAYOT, P.; BENEY, L. 2021. Antioxidant properties of ergosterol and its role in yeast resistance to oxidation. *Antioxidants*. 10(7). <https://doi.org/10.3390/antiox10071024>
- ENEROTH, P.; GORDON, B.; RYHAGE, R.; SJÖVALL, J. 1966. Identification of mono- and dihydroxy bile acids in human feces by gas-liquid chromatography and mass spectrometry. *Journal of Lipid Research*. 7(4):511-523. [https://doi.org/10.1016/S0022-2275\(20\)39261-0](https://doi.org/10.1016/S0022-2275(20)39261-0)
- FAUSTINO, C.; SERAFIM, C.; RIJO, P.; REIS, C.P. 2016. Bile acids and bile acid derivatives: use in drug delivery systems and as therapeutic agents. *Expert Opinion on Drug Delivery*. 13(8):1133-1148. <https://doi.org/10.1080/17425247.2016.1178233>
- GOBERNACIÓN DE CÓRDOBA, 2020. Gobernación de Córdoba Secretaría de Desarrollo Económico y Agroindustrial. Plan departamental de extensión agropecuaria departamento de Córdoba 2020-2023. Gobernación de Córdoba. 74p. Disponible desde Internet en: <https://www.minagricultura.gov.co/ministerio/direcciones/PublishingImages/Paginas/PDEA/CORDOBA.pdf>
- GUZIOR, D.V.; QUINN, R.A. 2021. Review: Microbial transformations of human bile acids. *Microbiome*. 9(1):1-13. <https://doi.org/10.1186/s40168-021-01101-1>

- JAILLIER-RAMÍREZ, A.M.; WAITZBERG, D.; BECERRA R.A. 2021. Relación entre los ácidos biliares y el microbiota intestinal ¿es posible considerarlo como un factor etiológico en diversas colangiopatías? Una revisión narrativa. *Revista de Nutrición Clínica y Metabolismo*. 4(4):40-55. <https://doi.org/10.35454/rncm.v4n4.287>
- KANDRAC, J.; KEVRESAN, S.; GU, J.K.; MIKOV, M.; FAWCETT, J.P.; KUHAJDA, K. 2006. Isolation and determination of bile acids. *European Journal of Drug Metabolism and Pharmacokinetics*. 31(3):157-177. <https://doi.org/10.1007/BF03190712>
- LAWSON, A.M.; SETCHELL, K.D.R. 1988. Mass spectrometry of bile acids. En: Setchell, K.D.R.; Kritchevsky, D.; Nair, P.P. (eds). *The bile acids: Chemistry, physiology, and metabolism*. Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-0901-7_5
- MARTÍNEZ MARTÍNEZ, M.A. 2002. Esteroles. Facultad de Química Farmacéutica, Universidad de Antioquia.
- MISHRA, R.; MISHRA, S. 2020. Updates in bile acid-bioactive molecule conjugates and their applications. *Steroids*. 159:108639. <https://doi.org/10.1016/j.steroids.2020.108639>
- NAVACCHIA, M.L.; MARCHESI, E.; PERRONE, D. 2020. Bile acid conjugates with anticancer activity: Most recent research. *Molecules*. 26:25. <https://doi.org/10.3390/molecules26010025>
- ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA, FAO; AGENCIA DE DESARROLLO RURAL. 2021. Plan integral de desarrollo agropecuario y rural con enfoque territorial; departamento de Córdoba. Divegráficas S.A.S. 170p. Disponible desde Internet en: <https://www.adr.gov.co/wp-content/uploads/2022/03/Tomo-1-Cordoba.pdf>
- PARTRIDGE, L.G.; DJERASSI, C. 1977. Mass spectrometry in structural and stereochemical problems. 250. Characteristic Fragmentations of Cholesterol Acetate. *The Journal of Organic Chemistry*. 42(17):2799-2805.
- PASTRANA FRANCO, O.; SANTAFÉ PATIÑO, G.; SÁNCHEZ ROMERO, E. 2019. Perfil lipídico y ensayos de las actividades antioxidante, insecticida y antialimentaria de la esponja marina *Iotrochota birotulata* (Iotrochotidae: Demospongiae). *Revista de Biología Tropical*. 67(1):213-223. <https://doi.org/10.15517/RBT.V67I1.32357>
- PERSSON, E.; LÖFGREN, L.; HANSSON, G.; ABRAHAMSSON, B.; LENNERNÄS, H.; NILSSON, R. 2007. Simultaneous assessment of lipid classes and bile acids in human intestinal fluid by solid-phase extraction and HPLC methods. *Journal of Lipid Research*. 48(1):242-251. <https://doi.org/10.1194/jlr.d600035-jlr200>
- SÁYAGO-AYERDI, S.G.; VAQUERO, M.P.; SCHULTZ-MOREIRA, A.; BASTIDA, S.; SÁNCHEZ-MUNIZ, F.J. 2008. Utilidad y controversias del consumo de ácidos grasos de cadena media sobre el metabolismo lipoproteico y obesidad. *Nutrición Hospitalaria*. 23(3):191-202.
- SANNASIDDAPPA, T.H.; LUND, P.A.; CLARKE, S.R. 2017. In vitro antibacterial activity of unconjugated and conjugated bile salts on *Staphylococcus aureus*. *Front Microbiol*. 8:1582. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01581>
- SHERIHA, G.M.; WALLER, G.R.; CHAN, T.; TILLMAN, A.D. 1968. Composition of bile acids in ruminants. *Lipids* 3(1):72-78. <https://doi.org/10.1007/BF02530972>
- SINGH, N.; BHATTACHARYYA, D. 2016. Identification of the anti-oxidant components in a two-step solvent extract of bovine bile lipid: Application of reverse phase HPLC, mass spectrometry and fluorimetric assays. *Journal of Chromatography B Analyt Technol Biomed Life Science*. 1019:83-94. <https://doi.org/10.1016/J.jchromb.2015.11.020>
- SINGH, A.N.; BARUAH, M.M.; SHARMA, N. 2017. Structure based docking studies towards exploring potential anti-androgen activity of selected phytochemicals against prostate cancer. *Science Report*. 7(1):1955. <https://doi.org/10.1038/S41598-017-02023-5>
- SUNG, J.Y.; SHAFFER, E.A.; COSTERTON, J.W. 1993. Antibacterial activity of bile salts against common biliary pathogens. Effects of hydrophobicity of the molecule and in the presence of phospholipids. *Digestive Diseases and Sciences*. 38(11):2104-2112. <https://doi.org/10.1007/BF01297092>
- TOKES, L.; JONES, G.; DJERASSI, C. 1968. Mass spectrometry in structural and stereochemical problems. CLXI. Elucidation of the course of the characteristic ring d fragmentation of steroids. *Journal of the American Chemical Society*. 90(20):5465-5477. <https://doi.org/10.1021/ja01022a025>
- VALLE Z., H.A.; SANTAFÉ P., G.G. 2009. Esteroles libres de la esponja marina *Mycale laevis*. *Vitae*. 16(1):103-109.



Fatty acid profile on the eggs and the muscle of *Eremophilus mutisii* females from three different fishing areas

Perfil de ácidos grasos en huevos y músculo de hembras de capitán de la sabana (*Eremophilus mutisii*) provenientes de tres sitios de captura

Rafael Rosado¹; Melissa Espejo-Cortés¹; Liliana Rodríguez¹; Gonzalo Díaz²; Jairo Granados³; Miguel Landines^{1*}

¹Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá, Facultad de Medicina Veterinaria y de Zootecnia, Laboratorio de Fisiología de Peces. Bogotá-Colombia; e-mail: rrosadop@unal.edu.co; mespejoc@unal.edu.co; lrodriguezv@unal.edu.co; malandinezp@unal.edu.co

²Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá, Facultad de Medicina Veterinaria y de Zootecnia, Laboratorio de Toxicología. Bogotá-Colombia; e-mail: gjdiazg@unal.edu.co

³Universidad de Cundinamarca, Sede Fusagasugá, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Laboratorio de Nutrición y Bioquímica. Fusagasuga, Cundinamarca-Colombia; e-mail: jgranados@ucundinamarca.edu.co

*corresponding author: malandinezp@unal.edu.co

How to cite: Rosado, R.; Espejo-Cortés, M.; Rodríguez, L.; Díaz, G.; Granados, J.; Landines, M. 2024. Fatty acid profile on the eggs and the muscle of *Eremophilus mutisii* females from three different fishing areas. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 27(2):e2367. <http://doi.org/10.31910/rudca.v27.n2.2024.2367>

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: July 18, 2022

Accepted: October 4, 2024

Edited by: Helber Adrián Arévalo Maldonado

ABSTRACT

In the production of *Eremophilus mutisii* fingerlings, natural sources are exclusively used as a source of broodstock. To establish quality criteria for eggs and to have an indirect approach to the nutritional requirements of mature specimens, a valid approach is to determine composition aspects, among which the analysis of fatty acid content in different tissues stands out. To this end, the fatty acid profile was determined in the gonads and muscle of 18 broodstock from three different water systems in the Cundiboyacense highlands, all in the Bogotá River basin. The final characterization was made by measuring 19 fatty acids in eggs and 18 in muscle, and a comparison was made between these and between the locations. Generally, the average contents of each fatty acid in eggs and muscle showed a similar behavior among the three sampled sites. It was consistent that the most represented fatty acids were palmitic acid (C16), oleic acid (C18:1), and docosahexaenoic acid (C22:6n-3), with similar proportions in the two tissues. The sets of saturated, monounsaturated, and polyunsaturated fatty acids remained at 32.4%, 28.7%, and 37.8%, respectively. The consistency of the results obtained between tissues and for different sites shows that they are probably an adequate characterization for *E. mutisii* and can be a solid baseline in egg quality evaluations and for consideration in eventual formulations of diets for broodstock.

Keywords: Egg quality; Endemic species; Fish egg composition; Fish muscle composition; Fish reproduction.

RESUMEN

En la producción de alevinos del capitán de la sabana *Eremophilus mutisii*, se depende exclusivamente del medio natural como fuente de reproductores y, tanto para establecer criterios de calidad de huevo como para aproximar requerimientos de tipo nutricional para ejemplares maduros, una aproximación válida es la determinación de aspectos de composición, en los que el contenido de ácidos grasos en diferentes tejidos suele ser uno de los procedimientos utilizados. Para el efecto, se determinó el perfil de ácidos grasos en gónadas y músculo de 18 reproductoras provenientes de tres sistemas hídricos diferentes en el altiplano cundiboyacense, todos en la cuenca del río Bogotá. La caracterización final se realizó con la medición de 19 ácidos en huevos y 18 en músculo y se efectuó una comparación entre estos y entre las localidades. En términos generales, los contenidos medios de cada ácido graso en huevos y músculo muestran un comportamiento similar entre los tres sitios muestreados. Fue constante que los ácidos mejor representados fueron el palmítico (C16), el oleico (C18:1) y el docosahexaenoico (C22:6n-3), con proporciones similares en los dos tejidos. Los conjuntos de ácidos grasos saturados, monoinsaturados y polinsaturados se mantienen en el 32,4, 28,7 y 37,8 % respectivamente. La consistencia de los resultados obtenidos entre los tejidos y para los diferentes sitios muestra que los mismos, podrían ofrecer una adecuada caracterización para el capitán de la sabana para construir una línea base sólida en evaluaciones de calidad de huevo y para considerar en eventuales formulaciones de dietas para reproductores.

Palabras clave: Calidad de huevo; Composición huevo; Composición músculo; Especies endémicas; Reproducción de peces.

INTRODUCTION

The *Eremophilus mutisii* is a silurid endemic to the Colombian Cundinamarca-Boyacá highlands which is classified as a threatened species, mainly due to aspects related to the deterioration of its habitat (Mojica *et al.* 2012; Álvarez & Rodríguez 2007). The interest in recovering this species in systems in which it has disappeared and, to some extent, the potential for its cultivation and commercialization, are circumstances that motivate the development of different research initiatives, among which those that address different aspects of reproductive management stand out (Landines P. *et al.* 2017).

There is consensus on the environmental importance of the species and its potential for aquaculture (Rodríguez Forero, 2000; Rosado-Puccini, 2007), the latter based on criteria of recognition and acceptability, as well as size and quality of the meat; it is a feasible candidate to expand the current fish farming offer for cold water systems in the high Andean region of Colombia, whose only representative is the rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*).

Regardless of the approach, both fundamentally converge on the need to develop the technical elements that make it possible to have breeding programs that allow, in practice, a constant supply of fry of the *E. mutisii*; although there are advances in this line, indeed relevant aspects related to the response to induction and management in incubation and larviculture are not yet consolidated (Rosado-Puccini, 2007). Only preliminary trials have been conducted on the maintenance of specimens in captivity, with no published references, and the work on induced reproduction, in most cases, is still being carried out with adult specimens from natural habitats.

On the other hand, the determination of the general composition aspects of gametes, incorporating fatty acid profiles, and the relationship with reproductive indexes is a valid approach to defining quality criteria for eggs and fry (Kjørsvik *et al.* 1990; Bobe 2015). In particular, fatty acids are part of the analyses on structure, and composition, because they influence maturation, reproduction, egg quality, hatching, early survival, and larval growth (Brooks *et al.* 1997). Knowledge of the general egg composition is a mechanism that allows inferences about the relationship between environmental supply and female nutrition, in addition to early fry performance outcomes. While it is the characteristics of the diet that ultimately modulate the compositional parameters of an egg, as recorded for several species (Tocher, 2010), the constituents that will ultimately be present are related to the nutritional resources to which females have had access to during the ovarian maturation process (Wiegand 1996), although, depending on the system, there are variations in the diet due to changes in the quality and quantity of the food supply (Tolussi *et al.* 2018; Lopes de Souza *et al.* 2020).

The gonads and muscle are tissues frequently used to determine normal ranges in aspects of body composition for a given species. During the reproductive season lipids and proteins are mobilized from the muscle to the gonads (Tolussi *et al.* 2018), so the nutrition of the breeder will modulate, among others, the supply of essential

fatty acids in the eggs that, in the end, are a determining part of reproductive success (Sharma *et al.* 2024). Therefore, compositional aspects thus become an analytical reference that allows to deduce or project the nutritional quality of the food supply to which they had, or should have, access to specimens destined for breeding (Izquierdo *et al.* 2001; Glencross, 2009). Possible deficiencies or differences can be detected, whether they are associated with a particular diet, or with the conditions in which the fish developed or were kept, considering that there is a seasonal availability of different types of food in the environment (Petenuci *et al.* 2021).

The approach to the fatty acid composition of eggs in specimens from the environment constitutes an input to determine how these should be considered in the formulation of diets designed for captive breeders (Rainuzzo, 2020), being a particularly useful and practical approach in cases where there are no references for a given species, as in the case of the *E. mutisii*.

Accordingly, this study describes the fatty acid composition of eggs and muscle in female *E. mutisii* and analyzes the possible variation of the profiles between different capture sites that are currently sources of broodstock.

MATERIALS AND METHODS

Experimental fish. The specimens were obtained from three sites, all in the Bogotá river basin. Of these, there were two lentic sites and one lotic: the Tominé reservoir, located near Sesquilé and Guatavita; the Fúquene lagoon, located between the municipalities of Susa and Fúquene; and finally in the axis of the Bogotá River in its upper course, in the municipality of Suesca. The capture period coincided with the rainy season in the central region of the country, and the sampling was concentrated in two months.

In all cases, fishing was carried out using hooks, obtaining a total of 42 specimens, distributed as follows: 12 females and 8 males in Tominé, 9 females in Suesca, and 11 females and 2 males in Fúquene. It should be noted that the collection of wild specimens for non-commercial purposes is authorized for the Universidad Nacional de Colombia by Resolution 000697 of the National Environmental Licensing Authority of Colombia (ANLA).

On the other hand, for the destination of the waste from the specimens worked on, the collection, transfer, and disposal protocols established for this purpose at the University were followed.

Six specimens were selected from each locality based on the criteria of fully developed ovaries, occupying a large part of the coelomic cavity, and with eggs with a diameter greater than 1000 μm , one of the indicators used to identify individuals suitable for reproduction induction procedures (Moncaleano Gómez *et al.* 2018). In the laboratory, the females were euthanized by overexposure to the anesthetic MS 222 (400 ppm), the total length in mm (approximation to 1 mm) and weight (approximation to 0.1 g) were determined; during dissection, the complete ovaries and liver were removed and weighed (approximation to 0.1 g).

For fatty acid analyses, a 5 g sample was taken from the middle portion of the right ovary and a 10 g sample of muscle from the dorsal muscle of the animal. The samples were stored at -70°C until processing (Valbuena-Villarreal *et al.* 2013; Rosado-Puccini *et al.* 2014).

Fatty acid profile. The samples were freeze-dried prior to lipid extraction, which was performed according to the methodology of Folch *et al.* (1957) and the chromatographic determination of fatty acids was carried out according to that described by Betancourt *et al.* (2005). For this purpose, each sample of eggs and muscle was homogenized in a chloroform and methanol solution, filtered and the solvent was centrifuged at 2000 rpm for 15 minutes, taking the organic phase to dryness under vacuum at room temperature. Methyl esterification was carried out using MethPrep II reagent (Alltech Associates Inc., Deerfield, IL, USA) and the determination was performed in a Shimadzu® GC-14A gas chromatograph, using helium as carrier gas. Fatty acid methyl esters were identified by comparing their retention times with those of a standard fatty acid mixture (Supelco 37 component FAME Mix, Supelco Inc., Bellefonte, PA, USA).

The profiling of eggs and muscle from each female was performed for 19 and 18 fatty acids respectively; totals corresponding to the monounsaturated (MUFA), polyunsaturated (PUFA) and saturated (SFA) groups were calculated. Those of the n-3 and n-6 series are recorded, in addition to the n-3/n-6 ratios.

Data analysis. Using the records of weight, length, and weights of gonads and liver, the condition factor (K) and the gonadosomatic (GSI) and hepatosomatic (HSI) indexes were calculated for each specimen; the data are presented as mean $\pm$ standard deviation (SD) and, using analysis of variance (ANOVA) ($p < 0.05$), it was determined if there were differences between capture sites.

Likewise, the values of each fatty acid are expressed as the mean $\pm$ standard deviation (SD). An ANOVA ($p < 0.05$) was performed, and Tukey's test was conducted to compare means. The software SPSS V25 statistical was used for analysis.

RESULTS AND DISCUSSION

The average total length of the 18 females studied was 24 ± 1.53 cm, ranging from 20 to 26.3 cm; the weight was 114.8 ± 29.4 g, ranging from 71.7 to 176.6 g; the group of fish from the Fúquene lagoon had the lowest total length and weight records. The mean data for the different variables for the selected females are presented in Table 1.

The size, in length and weight, of the females that were selected to obtain the samples is within the intervals that correspond to fish that have reached first maturity, which, in the species, as recorded by Pinilla *et al.* (2006), it is presented in sizes of 14 to 20 cm in total length and between 40 and 50 g in weight.

For the Tominé reservoir and the Bogotá River, the sizes of the females were similar (Table 1); this translates into a Condition Factor that did not present significant differences between the two sites and, in addition, the mean K for these sites is close to those reported by Moreno *et al.* (2019) for specimens from the same area of the Bogotá River. The same does not occur with the specimens from the Fúquene lagoon where, regardless of the smaller size presented by the females chosen, the K value was significantly lower (Table 1). However, since the condition of the fish is related to seasonal variations, it is feasible that, for this system, the values recorded are more a consequence of the time of capture and the particularities of the available food supply than to any other circumstance (Lopes de Souza *et al.* 2020).

Rodríguez Forero (2000), Álvarez & Rodríguez (2007), and Andrade-López (2006) describe the species as omnivorous, generalist in terms of feeding strategy, which suggests a broad trophic spectrum and that individuals within the same population are capable of using different resources at the same time. This characterization of habits and the variable supply of different food items in a system throughout an annual cycle explains the variations that occur in K, both among the mean values of the population in each season and among individuals in that system.

Table 1. Morphometric records and body and reproductive indexes in *E. mutisii* females from each of the three localities

	Tominé reservoir	Bogotá River (Suesca)	Fúquene Lagoon
Total length (cm)	24.67 ± 1.10	24.65 ± 0.78	22.75 ± 1.81
Weight (g)	135.91 ± 25.2	127.41 ± 10.66	81.20 ± 10.19
Condition Factor (K)	0.896 ± 0.05 a	0.853 ± 0.09 a	0.697 ± 0.106 b
Gonad weight (g)	17 ± 6.16	20.5 ± 2.83	11.1 ± 3.88
GSI (%)	12.2 ± 2.61 a	16.07 ± 1.62 b	13.47 ± 3.06 ab
HSI (%)	2.41 ± 0.86 a	2.38 ± 0.53 ab	1.46 ± 0.41 b

Data for each site are expressed as mean $\pm$ SD (n=6).

Different letters between rows of K, gonadosomatic index GSI and hepatosomatic index HSI indicate significant differences ($p < 0.05$).

Beyond the mean sizes of individuals, in the possible relationship of individual condition with reproductive indicators, the variation in the GSI of the fish among the three sites showed that the lowest value was presented for the Tominé reservoir (Table 1). Even so, the range of 12.2% at this site, up to 16.7% determined for the Bogotá River, are within the range and are in accordance with those evidenced with maturing or mature specimens recorded by Landines P. *et al.* (2017) for fish from the Suesca area, also in rainy periods. This interval also contains the value of 13.6% that Moreno *et al.* (2019) report for maturing females in the same area.

Regarding the HSI, there is also a lower, significant value in females from Fúquene, with 1.46%; in Tominé (2.41%) and Suesca (2.38%), the records were higher and without differences between them. Regardless of these differences, in all cases the mean values were higher than those recorded by Moreno *et al.* (2019) in the range of 0.4% to 1.9% for specimens from Suesca, an evaluation that included mature females. Specifically, the general analysis of condition relationships with reproductive status indicators in the set of females chosen suggests a similar state of maturation among localities; this circumstance validates the results, taking into account that the provision of fatty acids to the egg has vitellogenin as a vehicle (March, 1993), incorporated during vitellogenesis in ovarian development.

In a global view of the fatty acid profiles, the emerging picture is one of stability in the contents across localities. In fact, of the total fatty acids determined in the eggs, only four showed significant differences between sites; except for arachidonic acid (C20:4 n-6, with an average of 9.42%), the content of the other three acids was less than 5% and with high variability between females. A similar situation is also present in muscle, since out of 18 acids, four have differences among the zones, two of them with contents lower than 5%, with palmitic (21.77% on average) and arachidonic (with an average of 10.95%), better represented in content and with differences among the sites (Tables 2 and 3). The importance of arachidonic acid in reproduction and egg and seed quality in fish is well established and widely documented (Wu *et al.* 2021).

Comparison of the content of each fatty acid present at the three sites, performed between egg and muscle averages, showed differences in myristic (C14; 1.267% and 0.91%; $p=0.013$), eicosyl (C21; 1.391% and 0.969%; $p=0.006$), eicosapentaenoic (C20: 5n-3; 3.574% and 5.091%; $p=0.016$) and in the n3 set (19.393% and 22.01%; $p=0.001$).

It is also consistent that the highest contents among the SFA are with palmitic (C16:0), with oleic (C18:1c) among the MUFA and with docosahexaenoic (DHA, C22:6n-3) among the PUFA. There are no differences in the mean contents of these acids among localities and the variation among females in each zone is not high ($CV<15\%$). The sum of these three acids represents between 55.4% (Bogotá River, Suesca) and 57.8% (Fúquene lagoon) of the total present in the ovaries. This absolute value, based on the sum of the contents of the three fatty acids, is similar to that reported for rainbow trout (*O. mykiss*) by Rosado Puccini *et al.* (2012), in which

they reach up to 61%, and for red tilapia (*Oreochromis* sp.) by Valbuena-Villarreal *et al.* (2013), with 69% for the same group of acids. It is interesting to note that, in both trout and tilapia, species that are at the extremes of a feeding continuum, there is similarity in the absolute content of these three fatty acids and that this condition is conserved in the *E. mutisii*, which has an omnivorous diet with a carnivorous tendency (Álvarez & Rodríguez 2007; Rojas *et al.* 2018).

It is also noteworthy that, for all three species, the amounts of palmitic (C16:0) and oleic (C18:1) acids lie within narrow ranges, from 21 to 26% and 18 to 22%, respectively. This high relative weight in the content distribution is explained by their role and importance in sexual maturity (Sharma *et al.* 2024), in addition to being mobilized and incorporated during vitellogenesis, since these acids are used as an energy source during the embryonic process and until exogenous feeding begins. In this regard, Tocher (2003) mentions that the use of oleic acid is manifested in a significant and progressive decrease in its concentration as embryonic development advances. A similar utilization is recorded for palmitic acid in rainbow trout embryos, indicating its important role as an energy source in early development (Yeganeh, 2014). It is noteworthy that this fatty acid is the saturated fatty acid with the highest content in both muscle (between 20.72 and 21.43%) and eggs (between 20.62 and 23.08%), with similar means.

Regardless of the dietary and nutritional regime, minimum levels appear to be maintained for certain acids, even in the case that the nutrition scheme is based on diets that vary in different composition and balance (Tocher, 2010). Its importance is reaffirmed when the distribution of contents is usually similar, even among species of completely different habitats, habits and locations, which has been documented in several cases (Glencross, 2009). To illustrate the variety of species that maintain a similar pattern in the content of these three acids, examples include the Asian freshwater silurids such as *Ompok pabda* and *Wallago attu* (Mukhopadhyay & Ghosh, 2007), the estuarine fish *Centropomus undecimalis* (Yanes-Roca *et al.* 2009) and the Atlantic salmon *Salmo salar* (Pickova *et al.* 1999).

In this regard, Sargent *et al.* (2003) and Tocher (2003) state that the composition of fatty acids in eggs is usually conserved and less influenced by diet than other tissues, which reflects the importance of maintaining a specific composition in the gametes; provided that a diet is not particularly deficient in any component and minimum contents are maintained, the mobilization of fatty acids towards the gametes allows stable levels of concentration to be maintained at the end, which has been reported in different species (Sargent *et al.* 2003; Rosado Puccini *et al.* 2012; Valbuena-Villarreal *et al.* 2013; Rosado-Puccini *et al.* 2014). The correspondence observed in fatty acid concentrations between eggs and muscle for the *E. mutisii* seems to confirm these selective retention mechanisms (Wiegand 1996; Sargent *et al.* 2003), especially when the samples evaluated come from females captured in completely different systems.

Table 2. Mean content (%) and coefficient of variation (%) of each fatty acid analyzed for egg samples in female *E. mutisii* from the three locations.

Fatty acid	Tominé reservoir		Bogotá River (Suesca)		Fúquene Lagoon		<i>p-value</i>
	Media	CV	Media	CV	Media	CV	
C14:0	1.25 ± 0.29	23.24	1.36 ± 0.51	37.36	1.19 ± 0.28	23.12	0.755
C15:0	0.58 ± 0.07	11.59	0.63 ± 0.15	24.26	0.65 ± 0.38	57.94	0.874
C16:0	21.33 ± 1.4	6.57	21.43 ± 1.12	5.22	20.62 ± 0.85	4.13	0.432
C16:1	1.97 ± 0.34 a	17.50	2.71 ± 0.54 b	19.89	2.11 ± 0.36 ab	17.22	0.019
C17:0	1.21 ± 0.13	10.75	1.24 ± 0.21	17.11	1.22 ± 0.34	27.83	0.979
C18:0	7.56 ± 0.62	8.23	8.3 ± 0.85	10.22	8.35 ± 0.57	6.87	0.121
C18:1c	22.54 ± 1.38	6.12	23.12 ± 3.44	14.88	25.48 ± 1.37	5.39	0.093
C18:1t	3.36 ± 0.41 ab	12.04	3.79 ± 0.57 b	14.92	2.99 ± 0.33 a	10.93	0.025
C18:2 n-6	2.96 ± 0.37	12.58	2.75 ± 0.37	13.26	2.99 ± 0.87	29.01	0.757
C18:3 n-3 (ALA)	0.65 ± 0.1 a	15.31	0.93 ± 0.27 ab	28.71	1.07 ± 0.32 b	29.69	0.028
C20:1 n-9	1.08 ± 0.13	12.20	1.01 ± 0.15	13.63	1.25 ± 0.28	22.41	0.268
C20:2 n-6	0.99 ± 0.13 b	13.47	0.73 ± 0.21 a	28.74	0.76 ± 0.12 a	16.47	0.019
C21:0	1.43 ± 0.21	14.38	1.39 ± 0.34	24.09	1.23 ± 0.38	31.11	0.505
C20:4 n-6 (ARA)	10.19 ± 0.49 c	4.81	9.38 ± 0.42 b	4.44	8.7 ± 0.41 a	4.66	0.000
C20:5 n-3 (EPA)	3.57 ± 0.37	10.38	3.85 ± 0.33	8.54	3.31 ± 0.57	17.30	0.135
C22:4 n-6	2.43 ± 0.41	16.92	1.69 ± 0.73	42.89	1.98 ± 0.26	13.23	0.070
C22:5 n-6	1.35 ± 0.32	23.54	1.15 ± 0.19	17.38	1.3 ± 0.24	18.28	0.378
C22:5 n-3 (DPA)	3.12 ± 0.39	12.75	3.58 ± 0.6	16.78	3.09 ± 0.29	9.63	0.140
C22:6 n-3 (DHA)	12.42 ± 1.75	14.12	10.89 ± 1.21	11.10	11.71 ± 1.33	11.32	0.218
SFA	31.94 ± 0.99	3.10	32.95 ± 1.64	4.98	32.05 ± 0.8	2.51	0.303
MUFA	28.94 ± 1.29 a	4.47	30.71 ± 2.54 ab	8.27	31.83 ± 1.34 b	4.20	0.045
PUFA	37.69 ± 2.08 b	5.53	34.95 ± 1.35 a	3.85	34.89 ± 1.31 a	3.74	0.013
n-6	17.93 ± 0.81 b	4.50	15.7 ± 0.44 a	2.80	15.72 ± 0.39 a	2.48	0.000
n-3	19.76 ± 1.78	9.02	19.24 ± 1.24	6.43	19.18 ± 1.37	7.13	0.761
n-6/n-3	0.913 ± 0.083	9.08	0.819 ± 0.057	6.94	0.823 ± 0.067	8.10	0.058

Data for each fatty acid are expressed as mean ± SD (n=6).

Different letters between rows indicate significant differences (p<0.05).

Monounsaturated - MUFA, polyunsaturated - PUFA and saturated - SFA

Table 3. Mean content (%) and coefficient of variation (%) of each fatty acid analyzed for muscle samples in female *E. mutisii* from the three locations.

Fatty acid	Tominé reservoir		Bogotá River (Suesca)		Fúquene Lagoon		<i>p-value</i>
	Media	CV	Media	CV	Media	CV	
C14:0	0.89 ± 0.81	28.97	0.81 ± 0.26	32.88	1.04 ± 0.47	45.07	0.505
C16:0	21.58 ± 1.95 ab	9.04	23 ± 0.82 b	3.56	20.72 ± 1.33 a	6.43	0.045
C16:1	2.02 ± 0.54	26.71	1.92 ± 0.39	20.59	2.62 ± 1.51	57.52	0.406
C17:0	1.1 ± 0.38 a	34.78	0.9 ± 0.06 a	7.01	1.67 ± 0.38 b	22.73	0.002
C18:0	7.89 ± 1.02	12.92	8.61 ± 1.01	11.72	9.34 ± 1.33	14.24	0.119
C18:1c	20.48 ± 5.64	27.54	16.97 ± 3.9	23	22.86 ± 4.93	21.57	0.143
C18:1t	3.59 ± 0.38	10.61	3.22 ± 0.27	8.38	4.12 ± 1.29	31.24	0.179
C18:2 n-6	3.27 ± 0.87	26.68	3.29 ± 0.43	12.92	2.75 ± 1.14	41.36	0.486
C18:3 n-3 (ALA)	1.14 ± 0.37	32.27	1.1 ± 0.24	21.6	1.46 ± 0.71	48.36	0.397
C20:1 n-9	1.15 ± 0.29 b	25.68	0.97 ± 0.17 ab	17.71	0.59 ± 0.31 a	51.81	0.008
C20:2 n-6	0.88 ± 0.17	19.73	0.89 ± 0.27	30.82	0.75 ± 0.17	22.1	0.484
C21:0	0.99 ± 0.28	27.76	1.09 ± 0.27	25.05	0.8 ± 0.22	26.22	0.233
C20:4 n-6 (ARA)	11.19 ± 1.59 b	14.21	13.3 ± 1.85 b	13.9	8.37 ± 1.71 a	20.39	0.001
C20:5 n-3 (EPA)	4.82 ± 1.52	31.55	5.77 ± 1.21	20.93	4.68 ± 0.52	11.13	0.240
C22:4 n-6	1.47 ± 0.33	22.87	1.37 ± 0.29	21.33	1.59 ± 0.26	16.29	0.446
C22:5 n-6	1.34 ± 0.33	25	1.31 ± 0.3	23	1.22 ± 0.29	24.01	0.804
C22:5 n-3 (DPA)	2.91 ± 0.35	11.94	2.92 ± 0.44	15.13	3.35 ± 0.8	24	0.338
C22:6 n-3 (DHA)	13.29 ± 2.97	22.34	12.55 ± 1.38	10.96	12.04 ± 4.26	35.4	0.785
SFA	31.47 ± 1.64	5.2	33.33 ± 1.07	3.22	32.77 ± 1.5	4.68	0.103
MUFA	27.24 ± 5.98	21.94	23.08 ± 4.45	19.29	30.19 ± 6.06	20.09	0.116
PUFA	40.3 ± 5.72	14.19	42.5 ± 3.7	8.81	36.21 ± 5.92	16.36	0.141
n-6	18.14 ± 2.02 b	11.12	20.16 ± 2.1 b	10.419	14.69 ± 1.56 a	10.62	0.001
n-3	22.15 ± 4.05	18.26	22.35 ± 2.01	8.98	21.53 ± 4.55	21.11	0.923
n-6/n-3	0.832 ± 0.101 b	12.09	0.903 ± 0.07 b	7.753	0.697 ± 0.09 a	12.92	0.003

Data for each fatty acid are expressed as mean ± SD (n=6).

Different letters between rows indicate significant differences (p<0.05).

Monounsaturated - MUFA, polyunsaturated - PUFA and saturated - SFA

The set of saturates was found to be equivalent among localities, both for eggs (32.3%) and muscle (32.5%). In the monounsaturated fatty acids (MUFA) in eggs, differences between localities were present, but with a variation of 2.9% between the two extremes (28.9% in the Tominé reservoir and 31.8% in Fúquene); this is a narrow range, lower than the 8.7% reported for the same set in red tilapia (Valbuena-Villarreal *et al.* 2013) and 8.9% in rainbow trout (Rosado Puccini *et al.* 2012). Although in total monounsaturates in muscle were not different among zones, with an average of 26.8%,

the dispersion among females reached a coefficient of variation of about 20%. A similar result is shown by the polyunsaturated group, which is best represented in both egg and muscle content. With differences between localities and a variation of 2.8% in eggs, the maximum occurs in the Tominé reservoir (37.7%) and the minimum in Fúquene (34.9%); on the other hand, in muscle there are no differences between localities, but with an average of 39.7%, the variation among females ranges from 8.8 to 16.3%.

The comparative approach of fatty acid profiles between eggs from captive and wild specimens can be an indicator of the quality of diets provided to broodstock when fry production programs are maintained in farmed species; for the particular case of *E. mutisii*, considering the circumstances that currently define the management and the progress of research on the species, the profiles found can offer an adequate baseline for future work on broodstock nutrition (Sharma *et al.* 2024).

The relative stability observed in muscle and egg contents, as well as between localities, suggests that these profiles are a reference point for formulating and evaluating nutritional schemes, at least regarding fatty acids are concerned. The next steps for the control of reproductive management and obtaining fry in the *E. mutisii* must necessarily consider the reduction of dependence on wild catches in the environment and achieve the maintenance of broodstock in captivity conditions; thus, these results allow us to advance in complement with evaluations that contemplate other nutrients, in the development of possible diets for the species.

Acknowledgments. To the fishermen of the Tomine Reservoir, the Fuquene Lagoon, and the upper course of the Bogota River in Suesca municipality for obtaining the specimens and exchanging their knowledge with us. **Conflicts of interest:** The manuscript was prepared and revised with the participation of all authors, who declare that no conflict of interest would jeopardize the validity of the results presented. **Funding.** Call for Joint Projects: The University of Cundinamarca and The National University of Colombia 2017. Project 39777 “Determinación de parámetros de composición como indicadores de calidad en gametos del capitán de la sabana *Eremophilus mutisii* (Pisces: Trichomycteridae)”. **Authors' contribution:** Rafael Rosado: conceptualization, development, and design of methodology, data analysis and writing the manuscript; Liliana Rodríguez: data collection, data analysis and review and editing of the manuscript; Melissa Espejo: data collection and data analysis; Jairo Granados: data analysis and acquisition of financing; Gonzalo Díaz: data analysis and development of methodology; Miguel Landines: acquisition of financing, conceptualization, design of methodology, data analysis and writing the manuscript.

REFERENCES

- ÁLVAREZ, R.; RODRÍGUEZ, A. 2007. ¿Cómo es y dónde vive el capitán? En: Rodríguez Forero, A. ¿Quién es El Capitán? Fundación Al Verde Vivo - Universidad del Rosario. p.37-49.
- ANDRADE-LÓPEZ, J.M. 2006. Factor de Condición y distribución de tallas de (*Eremophilus Mutisii*) en el río Cormechoque y el embalse la copa, Boyacá. Revista Dahlia. Asociación Colombiana de Ictiólogos. 9:13-20.
- BETANCOURT, L.; DÍAZ, G.J.; AGUILAR, X.; RÍOS, J. 2005. Effect of ensiled trout (*Oncorhynchus mykiss*) intestines on productive traits of broiler chickens and the content of omega-3 fatty acids in liver, thighs and breast. Livestock Research for Rural Development. 17(9).
- BOBE, J. 2015. Egg quality in fish: Present and future challenges. *Animal Frontiers*. 5(1):66-72. <https://doi.org/10.2527/af.2015-0010>
- BROOKS, S.; TYLER, C.R.; SUMPTER, J.P. 1997. Egg quality in fish: what makes a good egg? *Reviews in Fish Biology and Fisheries*. 7:387-416. <https://doi.org/10.1023/A:1018400130692>
- FOLCH, J.; LEES, M.; SLOANE STANLEY, G. 1957. A simple method for the isolation and purification of total lipides from animal tissues. *The Journal of Biological Chemistry*. 226(1):497-509. [https://doi.org/10.1016/S0021-9258\(18\)64849-5](https://doi.org/10.1016/S0021-9258(18)64849-5)
- GLENCROSS, B.D. 2009. Exploring the nutritional demand for essential fatty acids by aquaculture species. *Reviews in Aquaculture*. 1(2):71-124. <https://doi.org/10.1111/j.1753-5131.2009.01006.x>
- IZQUIERDO, M.S.; FERNÁNDEZ-PALACIOS, H.; TACON, A.G.J. 2001. Effect of brood stock nutrition on reproductive performance of fish. *Aquaculture*. 197(1):25-42. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(01\)00581-6](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(01)00581-6)
- KJØRSVIK, E.; MANGOR-JENSEN, A.; HOLMEFJORD, I. 1990. Egg Quality in Fishes. En: Blaxter, J.H.S.; Southward, A.J. *Advances in marine biology*. Academic Press. p.71-113.
- LANDINES P, M.A.; PRIETO M., C.A.; RODRÍGUEZ V., L.; ROSADO P, R. 2017. Perfil de esteroides sexuales del capitán de la sabana (*Eremophilus mutisii*) durante un ciclo hidrológico completo. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*. 20(1):43-50. <https://doi.org/10.31910/rudca.v20.n1.2017.61>
- LOPES DE SOUZA, A.F.; PETENUCCI, M.E.; CAMPARIM, R.; VISENTAINER, J.V.; INHAMUNS DA SILVA, A.J. 2020. Effect of seasonal variations on fatty acid composition and nutritional profiles of siluriformes fish species from the amazon basin. *Food research international*. 132:109051. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109051>
- MARCH, B.E. 1993. Essential fatty acids in fish physiology. *Canadian Journal of Physiology and Pharmacology*. 71(9):684-689. <https://doi.org/10.1139/y93-102>
- MOJICA, J.; USMA OVIEDO, J.; ÁLVAREZ-LEÓN, R.; LASSO, C. 2012. Libro Rojo de Peces Dulceacuícolas de Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá. 319p. Disponible desde Internet en. https://awsassets.panda.org/downloads/libro_rojo_peces_dulceacuicolas_de_colombia__dic_2012.pdf

- MONCALEANO GÓMEZ, E.; SÁNCHEZ, C.; PRIETO MOJICA, C. 2018. Estudio histológico y morfológico del desarrollo embrionario del pez capitán de la sabana (*Eremophilus mutisii*). Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica. 21(2):479-489. <https://doi.org/10.31910/rudca.v21.n2.2018.1073>
- MORENO, J.M.; AGUILAR, F.A.; BOADA, N.S.; ROJAS, J.A.; PRIETO, C. 2019. Análisis morfométrico e índices corporales del capitán de la sabana (*Eremophilus mutisii*). Revista de la Facultad de Medicina Veterinaria y de Zootecnia. 66:141-153. <https://doi.org/10.15446/rfmvz.v66n2.82433>
- MUKHOPADHYAY, T.; GHOSH, S. 2007. Lipid profile and fatty acid composition of two silurid fish eggs. Journal of Oleo Science. 56(8):399-403. <https://doi.org/10.5650/jos.56.399>
- PETENUCI, M.E.; LOPES, A.P.; CAMPARIM, R.; SCHNEIDER, V.V.A.; VISENTAINER, J.V. 2021. Fatty acid composition in fractions of neutral lipids and phospholipids of *Hemisorubim platyrhynchos* with seasonal distinction. Journal of Food Composition and Analysis. 99:103885. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2021.103885>
- PICKOVA, J.; KIESSLING, A.; PETTERSSON, A.; DUTTA, P.C. 1999. Fatty acid and carotenoid composition of eggs from two nonanadromous Atlantic salmon stocks of cultured and wild origin. Fish Physiology and Biochemistry. 21(2):147-156. <https://doi.org/10.1023/A:1007860908911>
- PINILLA, G.; ABRIL, M.; GONZÁLEZ, E. 2006. Growth, feeding and reproduction of the catfish *Eremophilus mutisii* (Pisces: Trichomycteridae), from artificial reservoirs in Colombia. Revista de Biología Tropical. 54:589-597.
- RAINUZZO, J.R. 2020. Fatty acid and lipid composition of fish egg and larvae. En: Reinersten, H.; Dahle, L.A.; Jorgensen, L. Fish Farming Technology. CRC Press. p.43-48. <https://doi.org/10.1201/9781003077770>
- RODRÍGUEZ FORERO, A. 2000. El pez "Capitán de la Sabana", *Eremophilus mutisii*, en el Altiplano Cundiboyacense. Colombia: Ciencia & Tecnología. 18(2):38-40.
- ROJAS, J.E.; ECHAVARRIA, M.; LEMUS-PORTILLO, C. 2018. Plan de manejo y conservación de la especie (*Eremophilus mutisii*) para la jurisdicción CAR. Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca; Universidad Manuela Beltrán. Bogotá. 74p. Disponible desde Internet en: <http://hdl.handle.net/20.500.11786/36985>
- ROSADO PUCCINI, R.; LANDINES PARRA, M.Á.; DÍAZ GONZÁLEZ, G. 2012. Composición de ácidos grasos en ovas de trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*, Walbaum, 1792). Revista Medicina Veterinaria. 23:11-22. <https://doi.org/10.19052/mv.61>
- ROSADO-PUCCINI, R. 2007. Aspectos reproductivos y piscícolas. En: Rodríguez Forero, A. ¿Quién es El Capitán? Fundación al Verde Vivo; Universidad del Rosario. p.51-61.
- ROSADO-PUCCINI, R.; LANDINES-PARRA, M.; VALBUENA-VILLAREAL, R.D. 2014. Comparación entre perfiles de ácidos grasos en huevos de trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) y tilapia roja (*Oreochromis* sp.). Orinoquia. 18:260-268.
- SARGENT, J.R.; TOCHER, D.R.; BELL, J.G. 2003. The Lipids. En: Halver, J.E. Fish Nutrition. Third edition. Academic Press. San Diego, E.E.U.U. p.181-257.
- SHARMA, A.; SARMA, D.; JOSHI, R.; DAS, P.; AKHTAR, M.S.; PANDE, V.; SHARMA, P. 2024. Gonad indices, morphology and muscle fatty acid compositions of male and female golden mahseer (*Tor putitora*) sampled from lake Bhimtal (Himalaya) at different seasons of the year. Aquaculture and Fisheries. 9(4):603-616. <https://doi.org/10.1016/j.aaf.2022.08.002>
- TOCHER, D.R. 2003. Metabolism and functions of lipids and fatty acids in teleost fish. Reviews in Fisheries Science. 11(2):107-184. <https://doi.org/10.1080/713610925>
- TOCHER, D.R. 2010. Fatty acid requirements in ontogeny of marine and freshwater fish. Aquaculture Research. 41(5):717-732. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2008.02150.x>
- TOLUSSI, C.E.; GOMES, A.D.; RIBEIRO, C.D.S.; CANEPELE, D.; MOREIRA, R.G.; HONJI, R.M. 2018. Mobilization of energetic substrates in the endangered catfish *Steindachneridion parahybae* (Siluriformes: Pimelodidae): changes in annual reproductive cycle in captivity. Neotropical Ichthyology. 16:e170120. <https://doi.org/10.1590/1982-0224-20170120>
- VALBUENA-VILLARREAL, R.D.; ZAPATA-BERRUECOS, B.E.; ROSADO-PUCCINI, R. 2013. Caracterización de la composición en proteína, lípidos, energía y perfiles de ácidos grasos en huevos de tilapia roja (*Oreochromis* spp.). Revista de Medicina Veterinaria. 25:39-47. <https://doi.org/10.19052/mv.2297>
- WIEGAND, M.D. 1996. Composition, accumulation and utilization of yolk lipids in teleost fish. Reviews in Fish Biology and Fisheries. 6:259-286. <https://doi.org/10.1007/BF00122583>
- WU, J.; YANG, D.; DU, H.; YU, T.; LUO, J.; XU, Q.; WEI, Q. 2021. The influence of dietary arachidonic acid on growth, fatty acid profile and sex steroid hormones of F2 generation Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis*). Aquaculture Reports. 21:100818. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2021.100818>

- YANES-ROCA, C.; RHODY, N.; NYSTROM, M.; MAIN, K.L. 2009. Effects of fatty acid composition and spawning season patterns on egg quality and larval survival in common snook (*Centropomus undecimalis*). *Aquaculture*. 287(3):335-340. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2008.10.043>
- YEGANEH, S. 2014. Variations of fatty acids in Rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) during eyed egg and larval development stages. *International Journal of Aquatic Science*. 5(2):167-180.

Tipificación citomorfológica del tumor venéreo transmisible canino y su correlación con la presentación clínica en perros de Yopal-Casanare

Cytomorphological typing of canine transmissible venereal tumor and its correlation with clinical presentation in Yopal-Casanare dogs

Claudia Fernanda Medina-Lombana^{1*} ; Juan Camilo Rubiano-Chávez¹ 
Martha Eliana Lozano-Perez¹ ; Ana María Chavarro-Medina¹ 

¹Universidad Internacional del Trópico Americano. Facultad de Ciencias, Programa de Medicina Veterinaria y Zootecnia. Yopal - Casanare, Colombia; e-mail: clamedin87@gmail.com; c.rubiano.mv@gmail.com; marthalozano.es@unitropico.edu.co; anachavarro.es@unitropico.edu.co

*autor de correspondencia: clamedin87@gmail.com

Cómo citar: Medina-Lombana, C.F.; Rubiano-Chávez, J.C.; Lozano-Perez, M.E.; Chavarro-Medina, A.M. 2024. Tipificación citomorfológica del tumor venéreo transmisible canino y su correlación con la presentación clínica en perros de Yopal-Casanare. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 27(2):e2560. <http://doi.org/10.31910/rudca.v27.n2.2024.2560>

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 8 de 2024

Aceptado: diciembre 2 de 2024

Editado por: Helber Adrián Arévalo Maldonado

RESUMEN

Las características citomorfológicas del tumor venéreo transmisible canino (TVTC) permiten clasificarlo en los tipos linfocítico, plasmocítico y linfoplasmocítico (mixto). Este estudio se realizó en Yopal, Casanare (Colombia), una ciudad donde la información epidemiológica sobre esta enfermedad es inexistente, aunque su presencia es común en la práctica veterinaria local. Se analizaron muestras citológicas de 50 perros diagnosticados con TVTC, provenientes de 27 centros veterinarios de Yopal, donde se determinó la presentación clínica, de acuerdo con las regiones anatómicas afectadas, siendo estas: genital (80 %), extragenital (14 %) y genital/extragenital (6 %). Se identificaron los subtipos citomorfológicos linfocítico (76 %), mixto (22 %) y plasmocítico (2 %), con el fin de evaluar la relación entre la citomorfología y la presentación clínica de los casos estudiados. Los resultados no mostraron una relación de dependencia entre el subtipo celular y factores, como sexo, raza y edad del paciente. Asimismo, se determinó que la tipificación citomorfológica del TVTC y la presentación clínica son independientes, según la prueba exacta de Fisher. En conclusión, al igual que otros estudios, los hallazgos obtenidos sugieren la necesidad de investigaciones que integren aspectos citomorfológicos, histopatológicos y moleculares, para explorar la relación entre las características citomorfológicas del tumor y su comportamiento clínico.

Palabras clave: Citología; Linfocítico; Linfoplasmocítico; Plasmocítico; Tumor venéreo transmisible.

ABSTRACT

The cytomorphological characteristics of canine transmissible venereal tumor (CTVT) allow it to be classified into lymphocytic, plasmacytic, and lymphoplasmacytic (mixed) types. This study was conducted in Yopal, Casanare (Colombia), a city where epidemiological information on this disease is non-existent, although its presence is common in local veterinary practice. Cytological samples from 50 dogs diagnosed with CTVT from 27 veterinary centers in Yopal were analyzed, determining clinical presentation according to affected anatomical regions, which were: genital (80%), extragenital (14%), and genital/extragenital (6%). The cytomorphological subtypes identified were lymphocytic (76%), mixed (22%), and plasmacytic (2%) to evaluate the relationship between cytomorphology and clinical presentation in the cases studied. The results showed no dependency relationship between cellular subtype and factors such as sex, breed, and age of the patient. Furthermore, it was determined that the cytomorphological classification of CTVT and clinical presentation are independent, according to Fisher's exact test. In conclusion, as in other studies, the findings obtained suggest the need for research that integrates cytomorphological, histopathological, and molecular aspects to explore the relationship between the tumor's cytomorphological characteristics and its clinical behavior.

Keywords: Cytology; Lymphocytic; Lymphoplasmacytic; Plasmacytic; Transmissible venereal tumor.

INTRODUCCIÓN

El tumor venéreo transmisible canino (TVTC), también conocido como granuloma infeccioso, sarcoma de Sticker, linfosarcoma transmisible, sarcoma venéreo transmisible, granuloma infeccioso, condiloma canino y linfosarcoma contagioso (Abeka, 2019), afecta a los perros en casi todo el mundo y es considerado el linaje de cáncer más antiguo y divergente conocido en la naturaleza, el cual, ha conseguido una configuración genómica, que le permite la supervivencia a largo plazo (Strakova & Murchinson, 2014).

El TVTC tiene una distribución mundial y su prevalencia es mayor en regiones del sur de los Estados Unidos, América Central y del Sur, parte de África, el Lejano Oriente, el Medio Oriente y el sureste de Europa (Toledo & Reina Moreira, 2018).

En Colombia, existe poca información acerca del comportamiento epidemiológico del TVTC. Arcila-Villa *et al.* (2018) realizaron un estudio de prevalencia, mediante una encuesta electrónica, donde la prevalencia estimada no supera el 7,05 % anual, teniendo en cuenta, para la región de la Orinoquia, una prevalencia relativa de 0,019 % (tasa promedio de 4,6 personas por canino); con este dato, se podría inferir una baja prevalencia de TVTC en los llanos orientales de Colombia; sin embargo, no hay información disponible sobre la prevalencia de esta enfermedad en Yopal-Casanare, por lo tanto, tampoco se conoce el tipo citomorfológico que prevalece, ni la relación con la presentación clínica de la enfermedad.

Las características citomorfológicas de las células neoplásicas del TVTC permite distinguir entre dos tipos, linfocítico y plasmocítico, de modo que se puede clasificar en plasmocítico, linfocítico y mixto. Los estudios realizados apuntan a que el tipo plasmocítico tiene una mayor capacidad para desarrollarse en sitios extragenitales y hacer metástasis, lo que sugiere mayor malignidad (Santos Do Amaral *et al.* 2007; Jantzen Gaspar *et al.* 2009; Valençola *et al.* 2015; Setthawongsin *et al.* 2018). Por lo mismo, se considera necesario clasificar TVTC en cada caso, puesto que la citomorfología se refleja en el pronóstico y en la resistencia al tratamiento (Santos Do Amaral *et al.* 2007).

En un estudio con 20 casos de TVTC, se realizó clasificación y estadificación según el sistema TNM, para determinar la relación entre los hallazgos citológicos y el estadio clínico, donde se concluyó que, en los casos donde la estadificación era mayor, se relacionaba con el hallazgo de criterios de malignidad en los TVTC plasmocitoides, lo que sugiere la importancia de la evaluación citomorfológica junto con la estadificación, no solo para el diagnóstico, sino para establecer un pronóstico y plan terapéutico más adecuado (Montoya-Flórez *et al.* 2013; Patiño-Quiroz *et al.* 2020).

El objetivo del presente estudio fue realizar la caracterización citomorfológica de los casos positivos a TVTC en los perros atendidos en los principales centros veterinarios de Yopal, durante un periodo de 12 meses, para establecer información que permita correlacionar el tipo citomorfológico de TVTC, con la presentación clínica de las lesiones y otras variables, como sexo, raza y edad.

Este estudio es el primero con relación al TVTC en Yopal-Casanare y la información obtenida será de utilidad para tener una aproximación sobre el comportamiento epidemiológico y clínico de la enfermedad, favoreciendo el desarrollo de estrategias terapéuticas más eficientes para el control.

MATERIALES Y MÉTODOS

Tipo de estudio. Se realizó un estudio de tipo transversal descriptivo no experimental, mediante muestreo a conveniencia no probabilístico.

Localización. Fue realizado en la zona urbana de Yopal-Casanare, ubicado en las coordenadas 5° 20'60" N y 72°24' 0" O, a una altura de 390 m s.n.m., con una temperatura promedio anual de 26,8°C, humedad relativa de 75 %, precipitación media anual de 1.431 mm y clima cálido tropical tipo monzónico.

Población y muestra. Se tuvieron en cuenta los caninos diagnosticados positivos a TVTC mediante citología, procedentes de 27 centros clínicos veterinarios de la zona urbana de Yopal, atendidos desde agosto de 2022 a agosto de 2023.

La toma de muestras se realizó de dos formas: directamente en los centros veterinarios que reportaban el caso sospechoso, teniendo contacto con el paciente o, través del laboratorio clínico veterinario Medilab, ubicado en Yopal, que recibía las muestras tomadas directamente por los profesionales de las clínicas veterinarias; en esos casos, no se tenía contacto directo con el paciente.

Los datos tomados de los pacientes fueron: nombre, sexo, edad, raza, localización anatómica de la lesión, método de muestreo, diagnóstico citológico y tipificación citomorfológica.

Las técnicas utilizadas para la toma de muestras fueron impronta, hisopado y Punción Aguja Fina (PAF), según el tipo y la localización de la lesión, siendo más frecuentemente usada la impronta. El análisis citológico de las muestras se realizó mediante tinción de Wright. Para la determinación de la clasificación citomorfológica se tuvo en cuenta el protocolo de tipificación, según Santos Do Amaral *et al.* (2007), en el cual, se determina como TVTC plasmocítico: predominio del 60 % células con morfología ovoide, citoplasma abundante y núcleo excéntrico; TVTC linfocítico: predominio de 60 % de células con morfología redonda, citoplasma escaso, núcleo redondo y TVTC mixto: con células mixtas de tipo linfocítico y plasmocítico, en las que ninguno supera el 59 %.

Los extendidos celulares se observaron por microscopía de luz a objetivo 40X, seleccionando aleatoriamente 10 campos, para realizar el conteo de las células neoplásicas; la evaluación citomorfológica fue realizada por dos médicos veterinarios, especialistas en laboratorio clínico. Uno, perteneciente al laboratorio clínico veterinario Medilab y otro externo. La observación fue realizada por los analistas sin conocer el diagnóstico citomorfológico dado por el otro, con el fin de disminuir el sesgo en los resultados.

Análisis de datos. Los datos fueron sometidos a un análisis descriptivo, donde se generaron tablas de distribución de frecuencias para variables cualitativas y cuantitativas; para determinar la relación entre las variables cualitativas, se utilizó la prueba de Fisher exacto y el análisis de Kruskal Wallis (prueba no paramétrica); para determinar diferencias estadísticas significativas entre la edad y la tipificación citomorfológica, se manejó un nivel de significancia del 0,05. Los datos se trabajaron con el software estadístico R versión 4.2.2

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Sexo y raza. Durante el periodo de estudio se recolectaron un total de 50 muestras positivas a TVTC, de las cuales, 26 casos corresponden a machos y 24 a hembras (Tabla1). Estos resultados difieren de los estudios de Sousa *et al.* (2000), Vasconcelos Silva *et al.* (2007), Scarpelli *et al.* (2010), Huppes *et al.* (2014), Valençola *et al.* (2015), Collares Araujo *et al.* (2016), Ruckert Ramadinha *et al.* (2016), Pimentel *et al.* (2021) y Ramírez-Ante *et al.* (2021), en los que se estima que la frecuencia es mayor en hembras, atribuyendo este hallazgo a la conducta reproductiva, donde un solo macho positivo puede infectar a varias hembras; sin embargo, según Pimentel *et al.*

(2021), estos datos pueden ser contradictorios, debido a que varían ampliamente en otros estudios, como el de Seullner Brandão *et al.* (2002) y el de Ballesterero Fêo *et al.* (2016), donde se encuentra una mayor frecuencia en machos, por lo que no se puede definir que exista una predisposición por sexo.

La mayoría de los caninos que presentaron TVTC fueron de raza mestiza, seguidas por el dóberman pinscher, el pitbull y en menor proporción otras razas, como el bulldog inglés, el husky Siberiano, el labrador retriever y el samoyedo (Tabla 1). Si bien la raza no se considera como un factor decisivo para la transmisión por TVTC, autores, como Ganguly *et al.* (2013) y Schectman *et al.* (2022), encontraron una mayor prevalencia en perros de raza mestiza y perros de caza, como el pothound en la India, sugiriendo que la interacción molecular de un elemento transponible dentro del oncogén *c-myc* podría representar una predisposición genética del TVTC en razas, como la mestiza; sin embargo, no se puede pasar por alto que suele existir una tenencia más responsable por parte de los propietarios de animales de raza pura en comparación con los propietarios de animales de raza mixta, quienes, generalmente, les permiten a los animales deambular con mayor libertad.

Tabla1. Descripción de factores asociados a la Tipificación citomorfológica del tumor venéreo transmisible canino (TVTC), en centros veterinarios, de Yopal-Casanare (n=50).

Variable	Categoría	Frecuencia (número de animales)	Frecuencia relativa (%)
Tipificación citomorfológico	TVT Linfocítico	36	72
	TVT Mixto	13	26
	TVT Plasmocítico	1	2
Presentación clínica	Extragenital	7	14
	Genital	40	80
	Mixto	3	6
Raza	Bulldog inglés	1	2
	French poodle	2	4
	Husky Siberiano	1	2
	Labrador retriever	1	2
	Mestizo	38	76
	Pinsher	3	6
	Pitbull	3	6
	Samoyedo	1	2
Sexo	Hembra	24	48
	Macho	26	52

Edad. Los caninos objeto del estudio presentaban edades que oscilaban entre los 8 meses a 12 años; las edades más frecuentes estaban en los rangos de 1,6 a 3,3 años (promedio de 2,5 años), con una participación del 48 %, siendo una edad con un comportamiento reproductivo más activo, aumentando el factor de riesgo por el contacto sexual, el cual, se reduce significativamente, a

medida que alcanzan edades más avanzadas (Ganguly *et al.* 2013), como se observa en este estudio, ya que el 16 % de los caninos tenían una edad promedio de 4 años y el 2 % presentaron una edad promedio de 12,5 años.

Relación entre la tipificación citomorfológica del tumor venéreo transmisible canino (TVTC), la edad, sexo y raza. Para la edad y el subtipo citomorfológico, según la prueba no paramétrica de Kruskal- Wallis, no se presentaron diferencias estadísticas significativas, es decir, que la tipología citomorfológica no se ve influenciada por la edad del animal (Figura 1).

Se observó que la citomorfología de los casos de TVTC presentados es independiente del sexo, encontrando que del 48 % de las

hembras, el 34 % presentó tipología linfocítica y el restante 14 % presentó TVTC mixto, mientras que para machos, se presentaron las tres tipologías: 38 % linfocítico, 12 % mixto y 2 % plasmocítico.

Con relación a la tipificación citomorfológica del TVTC y la raza de los caninos objeto de estudio, se puede inferir que no existe dependencia entre estas variables (Tabla 2).

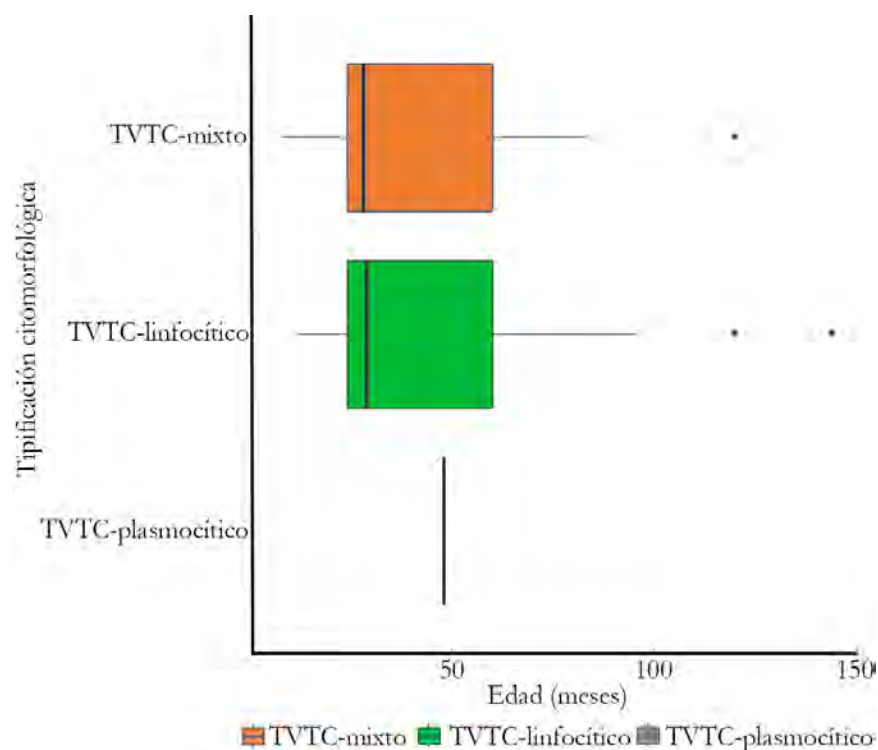


Figura 1. Relación de caninos que presentaron tumor venéreo transmisible canino (TVTC) y la edad del animal, en centros veterinarios, de Yopal-Casanare (n=50).

Tabla 2. Relación de las variables raza y sexo con la tipificación citomorfológica del tumor venéreo transmisible canino (TVTC), en centros veterinarios, de Yopal-Casanare, de acuerdo con la prueba exacta de Fischer (n=50).

Categorías		TVT Linfocítico %	TVT Mixto %	TVT Plasmocítico %	P (valor)
Raza	Bulldog inglés	2	0	0	0,8222
	French poodle	4	0	0	
	Husky Siberiano	2	0	0	
	Labrador retriever	2	0	0	
	Mestizo	52	22	2	
	Pinscher	2	4	0	
	Pitbull	6	0	0	
	Samoyedo	2	0	0	
Sexo	Hembra	34	14	0	0,8719
	Macho	38	12	2	

Tipificación citomorfológica. De todas las muestras procesadas durante el estudio, se determinó que el tipo citomorfológico linfocítico es el más frecuentemente presentado, correspondiente al 72 % de las muestras analizadas, seguido del tipo mixto, con el 26 % y, en menor frecuencia, el tipo plasmocítico, con un 2 %. Estos resultados son opuestos a los obtenidos en otros estudios, como los de Santos Do Amaral *et al.* (2007), Jantzen Gaspar *et al.* (2010), Sella Paranzini *et al.* (2015), Valençola *et al.* (2015) y Reis Filho *et al.* (2020), realizados en Brasil, en los cuales, la frecuencia de presentación es mayor para el tipo plasmocítico, seguido del tipo mixto y el menos frecuente, el linfocítico; sin embargo, en el estudio realizado por Ramírez-Ante *et al.* (2021), en la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad de Caldas, Colombia, también se encontró con mayor frecuencia la tipología linfoide, seguido por el plasmocítico y por último, el mixto. Algunos autores, como Santos Do Amaral *et al.* (2007) y Reis Filho *et al.* (2020), atribuyen la variabilidad en la frecuencia de subtipos morfológicos a la localización geográfica de donde se realizan los estudios, lo que indica que, probablemente, el subtipo linfocítico sea el que más se presenta en Colombia; sin embargo, se requieren más estudios para poder confirmar esta afirmación.

Presentación clínica. Se clasifica la presentación clínica según la ubicación anatómica de las lesiones en dos grupos principales, genital y extragenital; no obstante, es común encontrar un tercer grupo, que corresponde a pacientes con lesiones en localización, tanto genital como extragenital, simultáneamente, que se denomina en este estudio, como mixto. Debido a la característica

de aloinjerto de este tumor, así como su tropismo genital, las formas de presentación local asociadas al coito son consideradas las más frecuentes (Strakova & Murchinson, 2015; Valençola *et al.* 2015).

Se encontró una mayor presentación genital, seguido de la forma extragenital y por último, la mixta (Tabla 1), resultados que son consistentes con la dinámica biológica de la enfermedad y con otros estudios epidemiológicos realizados, como el de Pimentel *et al.* (2021).

Presentación clínica y clasificación citomorfológica. Se buscó determinar una relación de dependencia entre la presentación anatómica del tumor y su citomorfolología, mediante la prueba exacta de Fisher, estableciendo que estas variables son independientes (Figura 2; Tabla 3); de esta manera, no es posible establecer que el comportamiento citomorfológico este directamente relacionado con la ubicación anatómica del TVTC; sin embargo, se encontró una relación proporcionalmente más alta dentro de los casos de TVTC con citomorfolología mixta, en las localizaciones extragenitales del tumor, que entre la morfología linfoide y las ubicaciones extragenitales. Los resultados de Santos Do Amaral *et al.* (2007), en un análisis similar realizado en Brasil, con 158 pacientes, encontraron una diferencia estadísticamente significativa entre el tipo plasmocítico y mixto, con las localizaciones extragenitales, aunque su estudio identificó, como población predominante, el plasmocítico, con un 53 %, a diferencia de este estudio, donde la presentación relativa de esta forma citológica fue del 2 %.

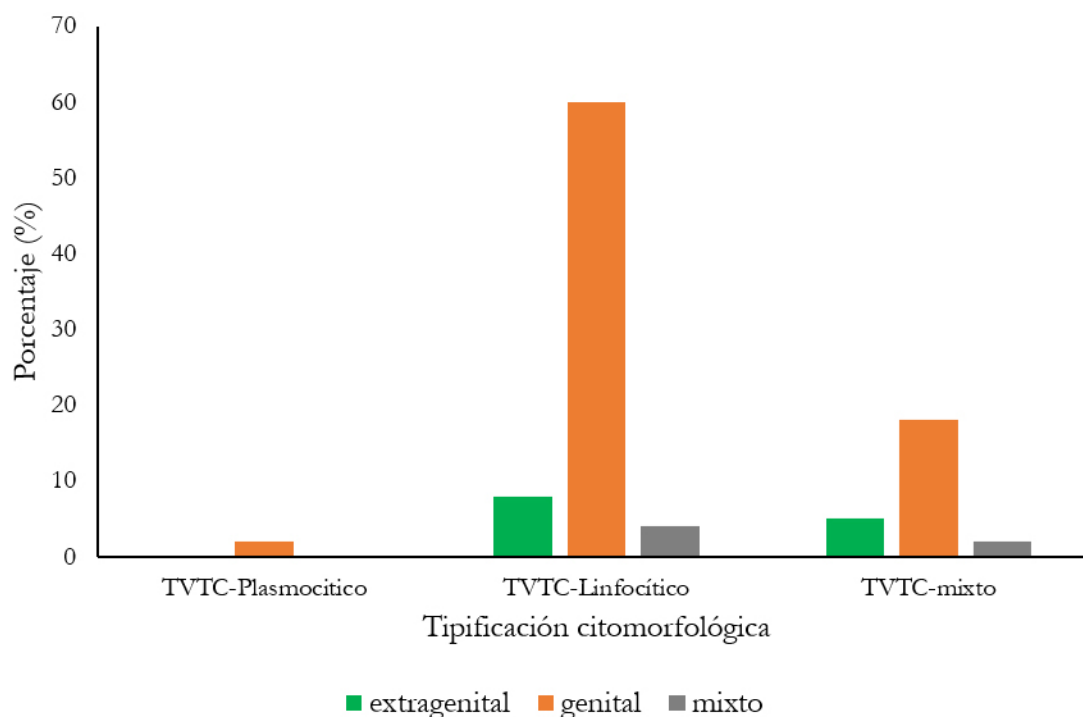


Figura 2. Relación de caninos que presentaron tumor venéreo transmisible canino (TVTC) y el sitio anatómico de la lesión, en centros veterinarios, de Yopal-Casanare (n=50).

Tabla 3. Relación de variables del sitio anatómico de la lesión con la tipificación citomorfológica del tumor venéreo transmisible canino (TVTC), en centros veterinarios, de Yopal-Casanare, de acuerdo con la prueba exacta de Fischer (n=50).

Categorías		TVT Linfocítico %	TVT Mixto %	TVT Plasmocítico %	P (valor)
Sitio anatómico de la lesión	Extragenital	8	6	0	0,5801
	Genital	60	18	2	
	Mixto	4	2	0	

Establecer una relación entre la citomorfología, la ubicación de las lesiones o el carácter agresivo es un tema controvertido. Sethawongsin *et al.* (2018) concluyeron, tras una evaluación citomorfológica, citomorfométrica y la respuesta de los pacientes a la quimioterapia, que las formas mixtas tenían mayor probabilidad de tener un comportamiento más invasivo o agresivo, al igual que lo sugerido por los resultados de este estudio, pero no lograron establecer una relación directa entre las variantes citomorfológicas y morfométricas con la respuesta de los pacientes a la quimioterapia.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos y los revisados, se podría inferir, tal como lo menciona Duzanski *et al.* (2017), que “se requiere una mayor claridad desde una perspectiva multicausal, entre los aspectos citomorfológicos, histopatológicos y moleculares, para poder determinar la asociación entre la tipología citomorfológica y el comportamiento biológico del tumor”.

Agradecimientos. Al laboratorio clínico veterinario Medilab y al semillero de investigación SISBAU (Semillero de investigación en sanidad y bienestar animal Unitropico), por el compromiso y apoyo en el desarrollo del proyecto. **Conflicto de intereses:** Este manuscrito fue preparado y revisado con la participación de los autores, quienes declaramos que no existe conflicto de intereses que pongan en riesgo la validez de los resultados encontrados. **Financiación:** Este estudio fue financiado por los autores. **Contribución de los autores:** Claudia Fernanda Medina Lombana: conceptualización, investigación, metodología y escritura del borrador original; Juan Camilo Rubiano Chávez: conceptualización, recursos e investigación; Martha Eliana Lozano Pérez y Ana María Chavarro Medina: curación de datos y recursos.

REFERENCIAS

- ABEKA, Y.T. 2019. Review on canine transmissible venereal tumor (CTVT). *Cancer Therapy & Oncology International Journal*. 14(4):86-94. <https://doi.org/10.19080/ctoj.2019.14.555895>
- ARCILA-VILLA, A.; DUSSÁN-LUBERT, C.; PEDRAZA-ORDÓÑEZ, F. 2018. Distribution and prevalence of transmissible venereal tumor in the Colombian canine population. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 31(3):180-187. <https://doi.org/10.17533/udea.rccp.v31n3a02>
- BALLESTERO FÊO, H.; MONTOYA FLOREZ, L.M.; SOUSA ROCHA, N. 2016. Tumor venéreo transmissível canino: análise da casuística 2008-2014 no hospital veterinário de Botucatu. *Veterinária e Zootecnia*. 23(3):409-418.
- COLLARES ARAUJO, D.C.; ANTONIOLI, T.; SOUZA COSTA, T.S.; GOMES DE CARVALHO, J.R.; VILLAREAL LAGUNA, A.G.; RUCKERT RAMADINHA, R.H.; FERNANDES I.J. 2016. Occurrence and location of transmissible venereal tumors in dogs seen at the Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro Veterinary Hospital: Oncology Sector between 2010 and 2014. *Revista Brasileira de Medicina Veterinária*. 38(3):277-280.
- DUZANSKI, A.P.; FÊO, H.B.; MONTOYA, L.M.; SEULLNER, C.V.; ROCHA, N.S. 2017. Canine transmissible venereal tumor: is its biological behavior changing? *The Anatomical Record*. 300(6):1009-1010. <https://doi.org/10.1002/ar.23527>
- GANGULY, B.; DAS, U.; DAS, A.K. 2013. Canine transmissible venereal tumour: A review. *Veterinary and Comparative Oncology (Reino Unido)*14(1):1-12. <https://doi.org/10.1111/vco.12060>
- HUPPES, R.R.; SILVA, C.G.; USCATEGUI, R.A.R.; DE NARDI, A.B.; SOUZA, F.W.; COSTA, M.T.; AMORIM, R.L.; PAZZINI, J.M.; FARIA, J.L.M. 2014. Tumor venéreo transmissível (TVT): Estudo retrospectivo de 144 Casos. *ARS Veterinária*. 30(1):13-18. <https://doi.org/10.15361/2175-0106.2014v30n1p13-18>
- JANTZEN GASPAR, L.F.; FERRERIRA, I.; MOLETA COLODEL, M.; SEULLNER BRANDÃO, C.V.; SOUSA ROCHA, N. 2010. Spontaneous canine transmissible venereal tumor: Cell morphology and influence on P-glycoprotein expression. *Turkish Journal of Veterinary and Animal Sciences*, 34(5): 447-454. <https://doi.org/10.3906/vet-0911-198>
- JANTZEN GASPAR, L.F.; SANTOS DO AMARAL, A.; BASSANI-SILVA, S.; SOUSA ROCHA, N. 2009. Imunorreatividade à glicoproteína-p nos diferentes tipos citomorfológicos de tumor venéreo transmissível canino. *Veterinária em foco*. 6(2):140-146.
- MONTOYA-FLOREZ, M.L.; PEDRAZA-ORDÓÑEZ, F.; MONTEIRO, S.; SEULLNER BRANDÃO, C.V.; SOUSA ROCHA, N. 2013. Clinical and cytological staging of transmissible venereal tumor at the Botucatu Veterinary Hospital. *Revista Veterinária y Zootecnia* 7(2):75-91. Disponible desde internet en: <http://hdl.handle.net/11449/140498>
- PATÍÑO-QUIROZ, B.; BALDRICH-ROMERO, N.; FUENTES-VILLAMIL, C.; ESPINOSA-NUÑEZ, A. 2020. El tumor venéreo transmisible dentro de la clasificación de neoplasias en caninos. *Revista Electrónica De Veterinaria*, 21(2):72-81.

- PIMENTEL, P.A.B.; OLIVEIRA, C.S.F.; HORTA, R.S. 2021. Epidemiological study of canine transmissible venereal tumor (CTVT) in Brazil, 2000–2020. En *Preventive Veterinary Medicine*. (Países Bajos) 197: 105526 <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2021.105526>
- RAMÍREZ-ANTE, J.C.; FERNÁNDEZ-RIOMALO, A.; PEDRAZA-ORDOÑEZ, F.J. 2021. Biological characteristics and clinical follow-up in natural cases of canine transmissible venereal tumour. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*. 32(2):18416 <https://doi.org/10.15381/rivep.v32i2.18416>
- REIS FILHO, N.P.; TORRES, A.A.A.; SILVA, M.P.C.; VENTURA, R.F.A.; BASSO, K.M.; FERREIRA, M.G.P.A.; DE NARDI, A.B.; FLORIANO, B.P.; CALDERÓN, C. 2020. Transmissible venereal tumor: cell proliferation (agnor) and response to chemotherapy correlated with cytomorphological classification. *ARS Veterinaria*. 36(2):140-147. <https://doi.org/10.15361/2175-0106.2020v36n2p140-147>
- RUCKERT RAMADINHA, R.; DOS SANTOS TEIXERA, R.; COSTA BOMFIM, P.; BEZERRA MASCARENHAS, M.; DO NASCIMENTO FRANÇA, T.; DA CUNHA PEIXOTO, T.; ROCHA COSTA, S.Z.; VARGAS PEIXOTO, P. 2016. Resposta do tumor venéreo transmissível canino à quimioterapia com sulfato de vincristina e vimblastina. *Brazilian Journal of Veterinary Medicine* 38(1):65-69.
- SANTOS DO AMARAL, A.; BASSANI-SILVA, S.; FERREIRA, I.; SANTOS DA FONSECA, L.; EVANGELISTA DE ANDRADE, F.H.; JANTZEN GASPARG, L.F.; SOUSA ROCHA, N. 2007. Cytomorphological characterization of transmissible canine venereal tumor. *Revista Portuguesa de ciências veterinárias*. 103(8):253-260.
- SCARPELLI, K.C.; VALLADÃO, M.L.; METZE, K. 2010. Predictive factors for the regression of canine transmissible venereal tumor during vincristine therapy. *Veterinary Journal*. 183(3):362-363. <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2008.11.009>
- SCHECTMAN, S.J.; KHANAM, A.; WALTERS, M.N.D.; KIRWAN, E.; SYLVESTER, W.R.; KHAN, F.A. 2022. A retrospective study of canine transmissible venereal tumour in Grenada, West Indies. *Veterinary Medicine and Science*. 8(3):1008-1012. <https://doi.org/10.1002/vms3.778>
- SELLA PARANZINI, C.S.; SANT'ANNA, M.C.; DI SANTIS, G.W.; MELLO MARTINS, M.I. 2015. Prevalence of different cytomorphological types of transmissible venereal tumours and the association with prognosis in dogs treated with vincristine sulphate - Retrospective study. *Semina: Ciências Agrárias*. 36(6):3795-3800. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2015v36n6p3795>
- SETTHAWONGSIN, C.; TANGKAWATTANA, S.; RUNGSIPIPAT, A.; TECHANGAMSUWAN, S. 2018. Computerized cytomorphometric and cytomorphological analysis of canine transmissible venereal tumours. *Journal of Comparative Pathology*. 163:18-22. <https://doi.org/10.1016/j.jcpa.2018.07.003>
- SEULLNER BRANDÃO, C.V.; GONÇALVES BORGES, A.; TITTON RANZANI, J.J.; CANEVESE RAHAL, S.; TEIXEIRA, C.R.; SOUSA ROCHA, N. 2002. Tumor venéreo transmissível: estudo retrospectivo de 127 casos (1998-2000). *Revista de Educação Continuada em Medicina Veterinária e Zootecnia do CRMV-SP*. 5(1):25-31. <https://doi.org/10.36440/recmvz.v5i1.3280>
- SOUZA, J.; SAITO, V.; NARDI, A.B.; RODASKI, S.; GUÉRIOS, S.D.; BACILA, M. 2000. Características e incidência do tumor venéreo transmissível (tvt) em cães e eficiência da quimioterapia e outros tratamentos. *Archives of Veterinary Science*. 5:41-48 <https://doi.org/10.5380/avs.v5i1.3884>
- STRAKOVA, A.; MURCHISON, E.P. 2014. The changing global distribution and prevalence of canine transmissible venereal tumour. *BMC Veterinary Research*. 10:168. <https://doi.org/10.1186/s12917-014-0168-9>
- STRAKOVA, A.; MURCHISON, E.P. 2015. The cancer which survived: Insights from the genome of an 11000 year-old cancer. *Current Opinion in Genetics and Development*. 30:49-55. <https://doi.org/10.1016/j.gde.2015.03.005>
- TOLEDO, G.N.; REINA MOREIRA, P.R. 2018. Tumor venéreo transmissível canino-revisão. *Investigacao*. 17(3):33-39. <https://doi.org/10.26843/investigacaov1732018p%25p>
- VALENÇOLA, R.A.; ANTUNES, T.T.; SORGATTO, S.; OLIVEIRA, B.B.; GODOY DA SILVA, K.C.; DE SOUZA, A.I. 2015. Aspectos citomorfológicos e frequência dos subtipos do tumor venéreo transmissível canino no município de campo grande, mato grosso do Sul, Brasil. *Acta Veterinaria Brasilica*. 9(1):82-86.
- VASCONCELOS SILVA, M.C.; RODRIGUES BARBOSA, R.; CELIS DOS SANTOS, R.; NUNES CHAGAS, R.S.; PEIXOTO COSTA, W. 2007. Avaliação epidemiológica, diagnóstica e terapêutica do tumor venéreo transmissível (tvt) na população canina atendida no hospital veterinário da Ufersa. *Acta Veterinaria Brasilica*. 1(1):28-32.

Optimization of a cape gooseberry colloidal system for the micro-encapsulation process

Optimización de un sistema coloidal de uchuva para el proceso de microencapsulación

Soany Eraso-Grisales^{1*}; Misael Cortés-Rodríguez¹; Andrés Hurtado-Benavides²

¹Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, Facultad Ciencias Agrarias, Departamento Ingeniería Agrícola y Alimentos, Grupo de Investigación Alimentos Funcionales (GAF). Medellín, Antioquia - Colombia; e-mail: skerasog@unal.edu.co; mcortesro@unal.edu.co

²Universidad de Nariño, Facultad de Ingeniería Agroindustrial, Grupo de Investigación Tecnologías Emergentes en Agroindustria (TEA). Pasto - Nariño, Colombia; e-mail: ahurtadob@hotmail.com

*Corresponding author: mcortesro@unal.edu.co

How to cite: Eraso-Grisales, S.; Cortés-Rodríguez, M.; Hurtado-Benavides, A. 2024. Optimization of a cape gooseberry colloidal system for the micro-encapsulation process. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 27(2):e2060. <http://doi.org/10.31910/rudca.v27.n2.2024.2060>

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 for High Quality by the Ministry of National Education.

Received: May 26, 2023.

Accepted: July 7, 2024.

Edited by: Helber Adrián Arévalo Maldonado

ABSTRACT

Cape gooseberry is a fruit that contains various active compounds such as vitamins A, B, and C, proteins, minerals, tocopherols, and carotenoids, among others, which provide health benefits. The objective of this research was to experimentally optimize a colloidal system formulation based on cape gooseberry, gum arabic (GA), and maltodextrin (MD) ($SC_{U+GA+MD}$) with the purpose of being subsequently used in a spray-drying micro-encapsulation process to protect and preserve its active components. A shear homogenizer colloid mill type was employed for the colloidal system preparation. The formulation design was conducted using a face-centered central composite design ($\alpha = 1$), considering the independent variables: GA (1.0-3.0%) and MD (9.5-13.5%), and the dependent variables: total solids (TS), viscosity (μ), zeta potential (ζ), particle size ($D_{[4,3]}$), total phenols (TF), and antioxidant capacity (DPPH and ABTS assays). The optimal formulation was achieved with MD: 12.3% and GA: 3.0%, where the dependent variables were: TS: $32.2 \pm 0.1\%$, μ : 581.0 ± 7.8 cP, ζ : -22.6 ± 0.6 mV, $D_{[4,3]}$: 77.9 ± 2.0 μ m, TF: 97.2 ± 1.1 mg GAE 100 g^{-1} , DPPH: 12.6 ± 1.4 mg TE 100 g^{-1} , ABTS: 13.5 ± 0.6 mg TE 100 g^{-1} . Experimental validation of the shear homogenization process for an integral colloidal system of cape gooseberry confirmed its physicochemical stability with significant solid content, rendering it suitable for spray-drying micro-encapsulation processes.

Keywords: Colloidal stability; Electrostatic forces; Homogenization; *Physalis peruviana* L.; Van der Waals forces.

RESUMEN

La uchuva es una fruta que contiene una variedad de compuestos activos como vitaminas A, B y C, proteínas, minerales, tocoferoles, carotenoides, entre otros que otorgan beneficios a la salud. El objetivo de esta investigación fue optimizar experimentalmente la formulación de un sistema coloidal a base de uchuva, goma arábiga (GA) y maltodextrina (MD) ($SC_{U+GA+MD}$), con fines de ser utilizado posteriormente en un proceso de microencapsulación por secado por aspersión, y así, proteger y conservar sus componentes activos. Se utilizó un homogenizador por cizalla tipo molino coloidal para la preparación del sistema coloidal y el diseño de la formulación se realizó utilizando un diseño experimental central compuesto cara centrada ($\alpha = 1$), considerando las variables independientes: GA (1,0-3,0 %) y MD (9,5-13,5 %) y las variables dependientes: sólidos totales (TS), viscosidad (μ), potencial zeta (ζ), tamaño de partícula ($D_{[4,3]}$), fenoles totales (TF), capacidad antioxidante (métodos DPPH y ABTS). La formulación óptima se obtuvo con una formulación que contenía MD: 12,3 % y GA: 3,0 %, donde las variables dependientes fueron: TS: $32.2 \pm 0.1\%$, μ : $581,0 \pm 7,8$ cP, ζ : -22.6 ± 0.6 mV, $D_{[4,3]}$: 77.9 ± 2.0 μ m, TF: $97,2 \pm 1,1$ mg GAE 100 g^{-1} , DPPH: $12,6 \pm 1,4$ mg TE 100 g^{-1} , ABTS: $13,5 \pm 0,6$ mg TE 100 g^{-1} . La validación experimental del proceso de homogenización por cizalla de un sistema coloidal integral de uchuva permitió garantizar su estabilidad fisicoquímica con un importante contenido de sólidos, y adecuado para ser utilizado en procesos de microencapsulación por secado por aspersión.

Palabras clave: Estabilidad coloidal; Fuerzas electrostáticas; Fuerzas de Van der Waals; Homogeneización; *Physalis peruviana* L.

INTRODUCTION

Cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.) is characterized by its high nutritional value: vitamins A, B (thiamine, niacin, and riboflavin) and C, proteins and minerals such as phosphorus, iron, potassium and zinc (Olivera-Tenorio *et al.* 2016), antioxidant compounds such as tocopherols and carotenoids (Etzbach *et al.* 2018), and withanolides that provide health benefits: repellent, antibacterial, anti-inflammatory, antitumor, and antihepatotoxic activity (Sang-Ngern *et al.* 2016). The fruit has a weight percentage distribution of extracted pulp of 75.4 – 84.5%, seeds of 7.3 – 13.2%, and peel of 5.8 – 11.4% (Petkova *et al.* 2021). Seeds have nutritional value due to the content of essential fatty acids, natural antioxidants, and phytosterols such as campesterol, β -sitosterol, and stigmasterol, which provide antioxidant properties and reduce blood cholesterol levels. In addition, the presence of pectins as a contribution of dietary fiber ($4.9 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$) is highlighted in the peel and pulp of cape gooseberry (Petkova *et al.* 2021).

One way to preserve these potential healthy characteristics of cape gooseberry, in all its constituents, is through the spray-drying (SD) micro-encapsulation process. In this context, homogenized fruits are heterogeneous colloidal systems of two or more phases with the presence of insoluble particles, comprised of fragments of cellular tissues, and oily particles dispersed in an aqueous phase rich in soluble compounds such as sugars, acids, salts, pectins, phenolic compounds, among others (Dahdouh *et al.* 2016). These systems depend on particle-particle and particle-continuous phase physicochemical interactions, which define physicochemical stability based on the forces present: attractive or Van der Waals forces, repulsive or electrostatic, steric, hydration, or hydrophobic forces (Piorkowski & McClements, 2014).

In micro-encapsulation processes using SD, the physicochemical interactions of nutrition are closely related to chemical composition and more particularly to the presence of proteins, polysaccharides of the cell walls of fruits (pectins, cellulose, hemicelluloses), and drying additives such as maltodextrin (MD), gum arabic (GA), and others. These act as micro-encapsulants with high molecular weight and high glass transition temperature (T_g), which protect the active components and reduce the stickiness and hygroscopicity of the product obtained by SD (Islam Shishir & Chen, 2017). Additives such as MD and GA have functions that include volume and film formation properties, binding capacity, and reduction of the O_2 permeability of the matrix (Lee *et al.* 2018). This compositional complexity modifies the rheology of the continuous phase of the colloidal system, due to the presence of a large number of hydroxyl ($-\text{OH}$) groups that increase affinity with H_2O molecules, reduce kinetic movement, and improve molecular and interparticle interactions, contributing to increasing the stability of the colloidal system (Dahdouh *et al.* 2016). In SD micro-encapsulation processes, in addition to the design of a thermodynamically stable formulation (Islam Shishir & Chen, 2017), a maximum content of total solids (TS) and a viscosity (μ) adjusted to the SD design criteria, which allows effective spraying (Santos *et al.* 2017), is required.

The objective of this research was to optimize the colloidal system of cape gooseberry pulp, seed, and peel, together with GA and MD ($\text{SC}_{\text{U+GA+MD}}$), allowing its effective use in the micro-encapsulation process.

MATERIALS AND METHODS

Colombia ecotype cape gooseberry fruits from eastern Antioquia were used. The fruit had a maturity degrees of 4, 5, and 6 according to NTC 4580 (ICONTEC, 1999). The micro-encapsulants for drying were GA (767 AA Master Gum FT) and MD (Ingredion MOR-REX 1720) with dextrose equivalent 18-20.

Preparation of cape gooseberry-based colloidal system formulations ($\text{SC}_{\text{CG+GA+MD}}$). The cape gooseberry fruits were disinfected by immersion in a 1400 ppm solution of Citrosan® (0.25% v/v) (Diken International, Mexico) for 10 min. They were disintegrated in a homogenizer (Sammic TR-350), and the resulting dispersion was homogenized again in a JMF 80A colloidal mill (Wenzhou Qiangzhong Machinery Technology Co., Ltd.) with the clearance adjusted at the minimum and recirculation time of 3 min, thus obtaining the homogenized integral cape gooseberry (U_H). Batches of 2000 g of $\text{SC}_{\text{U+GA+MD}}$ were prepared according to the treatments described in the experimental design (Table 1). U_H , GA, and MD were mixed in a homogenizer (Silverson Machines Ltd. Model L5M-A, England) at 10,000 rpm for 10 min. A temperature-controlled bath at $25 \pm 1^\circ\text{C}$ was used.

Characterization of $\text{SC}_{\text{U+GA+MD}}$. TS: were determined by the difference $100 - X_w$ (%). X_w : method 20.013 (AOAC, 2012). μ : methodology described by Wardy *et al.* (2014), rheometer (Brookfield DV-III Ultra, Brookfield Engineering Laboratories, Inc, USA), 25°C , RV3 spindle, 100 rpm. ζ : methodology described by Tamnak *et al.* (2016), Zetasizer Nano ZS90 (Malvern Instruments Ltd., Worcester, UK). $D_{[4,3]}$: methodology described by Dahdouh *et al.* (2018), Mastersizer 3000 (Malvern Instrument Ltd, Worcestershire, UK), Hydro LV system, refractive index of $\text{SC}_{\text{U+GA+MD}}$, (1.368), water refractive index (1.330), particle absorption index (0.45), and laser obscuration level (15). For TF and antioxidant capacity, a methanolic extraction was carried out according to the methodology described by De los Rios *et al.* (2021). TF (Folin-Ciocalteu method) and antioxidant activity (ABTS and DPPH) were carried out according to the methodology described by Gallón Bedoya *et al.* (2020). Gallic acid equivalent (GAE) calibration curves were performed between 0 to $300 \mu\text{g GAE/mL}$ ($R^2 = 0.989$) and TF results were expressed as $\text{mg GAE } 100 \text{ g}^{-1} \text{SC}_{\text{U+GA+MD}}$. Trolox equivalent (TE) calibration curves for ABTS and DPPH were constructed from 50 to $250 \mu\text{M}$ ($R^2 = 0.998$) and $0.02\text{--}0.12 \text{ mg mL}^{-1}$ ($R^2 = 0.997$), respectively, and values were expressed as $\text{mg TE } 100 \text{ g}^{-1} \text{SC}_{\text{U+GA+MD}}$. For the active components, the characterization of a fresh (unhomogenized) cape gooseberry control was included for a comparative analysis.

Experimental design, statistical, and data analysis. We worked with a face-centered central composite design ($\alpha = 1$) based on the independent variables GA (1.0–3.0%) and MD (9.5–13.5%), and the dependent variables total solids (ST), viscosity (μ), zeta potential (ζ), particle size $D_{[4,3]}$, total phenols (TF), and antioxidant capacity (DPPH and ABTS methods) (13 experiments, Table 1). For statistical analysis, Statgraphics Centurion XVII.II software was used, and an analysis of variance (ANOVA) with a significance level of 5% ($p < 0.05$) was performed.

The experimental optimization was carried out by setting desirable criteria, weights, and impacts to the dependent variables, according to the desirable characteristics in the final product. Data were adjusted to a second-order polynomial model (equation 1), where Y is the dependent variable, β_0 is constant, β_A and β_B are the linear coefficients; β_A^2 and β_B^2 are the quadratic coefficients; and β_{AB} is the coefficient of linear interaction. The validation of the models was carried out based on the relative mean error (RME) (equation 2) between the value of the variable predicted by the model and the experimental response to the optimal condition (3 replicates).

$$Y = \beta_0 + \beta_A A + \beta_B B + \beta_A^2 A^2 + \beta_B^2 B^2 + \beta_{AB}$$

equation 1

$$RME = \left| \frac{\text{Model value} - \text{Experimental value}}{\text{Model value}} \right| \times 100$$

equation 2

RESULTS AND DISCUSSION

Table 1 presents the mean values and standard deviations, and Figure 1 shows the response surface graphs of the variables dependent of $SC_{U+GA+MD}$.

Total solids. The mean TS values ranged between 27.4-33.2%, with the ANOVA showing significant differences ($p<0.05$) regarding the MD. The response surface graph (Figure 1a) shows an increase in TS (yellow-orange zones) when the MD and GA in the $SC_{U+GA+MD}$ increase. The effect of MD is greater than that provided by GA, due to the greater contribution of kg of solids in the formulations. This situation is attributed to the fact that these high molecular weight ingredients have hydrophilic functional groups (aldehydes, OH, among others), that interact with water molecules through Van der Waals attractions and H₂ bridges (Saavedra- Leos *et al.* 2018). The increased TS decreases the Xw content of $SC_{U+GA+MD}$, which favors energy expenditure during the micro-encapsulation process (Islam Shishir & Chen, 2017).

Table 1. Results of variables dependent on the colloidal system of cape gooseberry (pulp, peel, and seeds), gum arabic, and maltodextrin.

Experiment	GA (%)	MD (%)	TS (%)	μ (cP)	ζ (mV)	$D_{[4,3]}$ (μ m)	TP (mg GAE/100 g)	DPPH (mg TE/100 g)	ABTS (mg TE/100 g)
1	2	13.5	29.0±0.0	438.0±38.0	-21.4±0.5	185.0±1.0	80.6±1.9	4.7±0.2	19.2±0.2
2	3	9.5	29.1±0.0	477.3±4.6	-22.7±0.2	113.7±1.3	58.7±0.5	4.5±0.1	5.2±0.1
3	2	9.5	27.4±0.1	427.0±10.0	-19.8±0.1	111.0±1.0	60.6±1.7	2.3±0.1	6.5±0.6
4	1	9.5	27.8±0.0	448.7±3.1	-20.3±0.1	119.3±6.5	61.3±2.7	7.6±0.3	8.2±0.4
5	1	11.5	27.9±0.1	444.7±29.3	-25.4±0.3	97.8±1.2	72.1±1.9	14.8±0.4	14.6±0.7
6	2	11.5	30.2±0.0	470.7±17.6	-20.4±0.4	171.0±3.6	75.6±0.6	9.6±0.3	14.1±0.6
7	2	11.5	30.2±0.0	519.0±19.2	-21.2±0.6	187.0±7.5	74.1±0.7	5.9±0.2	14.9±0.4
8	2	11.5	29.4±0.1	408.7±1.5	-17.1±0.5	123.3±2.1	76.0±1.5	10.2±0.4	10.2±0.3
9	2	11.5	29.9±0.1	460.0±7.0	-19.5±0.9	105.0±1.0	75.8±1.7	8.3±0.2	13.6±0.6
10	2	11.5	27.7±0.0	332.3±7.1	-19.8±0.4	127.3±1.5	73.5±1.1	10.7±0.5	9.6±0.4
11	3	13.5	33.2±0.5	477.7±7.1	-18.7±0.1	190.0±2.1	80.4±0.5	16.7±0.2	19.7±0.7
12	1	13.5	30.9±0.0	509.3±5.9	-18.4±0.4	182.7±2.1	79.9±1.7	14.1±0.4	19.9±0.1
13	3	11.5	30.8±0.0	643.7±12.4	-24.9±0.3	85.1±0.8	77.5±3.0	4.8±0.0	13.1±0.2

Viscosity. ANOVA did not show significant differences in μ ($p > 0.05$) of $SC_{U+GA+MD}$ regarding the independent variables nor with their linear or quadratic interactions. Its mean values range between 332.3 and 643.7 Cp. This rheology characterizes $SC_{U+GA+MD}$ as a fluid system that would contribute to forming smaller droplets in the SD process (Islam Shishir & Chen, 2017). The fluctuations found can be attributed to changes in the maturation of cape gooseberry, which modifies the content of the pectic, cellulosic, and hemicellulosic components of the cell walls (Guevara Collazos *et al.* 2019). The response surface graph (Figure 1b) shows a trend of increasing μ when GA levels were higher, given that its structure has long branches with a voluminous arrangement able to form bonds, through H_2 bridges, with water molecules, producing an increase in hydrodynamic volume, which induces changes in the deformation resistance to the matrix (Tuan Azlan *et al.* 2020). In turn, protein (0.3 to 1.9 g 100 g⁻¹ U) and seed oil (1.8 to 2.0%) (Petkova *et al.* 2021), could be interacting with GA, which has emulsifying properties, being absorbed onto oil droplets through its protein residues (Tuan Azlan *et al.* 2020).

Zeta Potential (ζ). Zeta (ζ) is a parameter associated with the repulsive forces present in colloidal systems. ANOVA did not show significant differences in ζ ($p < 0.05$) concerning the independent variables or their interactions, with mean values fluctuating between -17.1 and -25.4 mV. The $SC_{U+GA+MD}$ is characterized by the fact that the Stern layer (1st electrical layer) has a negative charge at the interface of the particles (insoluble material and fatty component), provided by the anions dissociated from the aqueous phase of the cape gooseberry and by the non-hydrolyzed pectin (Cano-Sarmiento *et al.* 2018). Meanwhile, the 2nd electrical layer (+) is mainly due to the dissociated cations from the cape gooseberry (Ca, P, Fe) (Petkova *et al.* 2021).

This double electrical layer contributes to the stability of adjacent particles due to the electrostatic repulsion forces generated between them (Matusiak & Grządka, 2017). The overall stability of $SC_{U+GA+MD}$ depends on the balance between attractive Van der Waals forces and electrostatic or repulsive forces, and other types: steric, hydration, hydrophobic, and phase separation forces (Wan *et al.* 2018; Zhu *et al.* 2020). The response surface graph of ζ (Figure 1c) shows a curvilinear behavior, where the highest negative electrical potential ($> |\zeta|$) ($>$) is reached when the $SC_{U+GA+MD}$ formulation has concentrations of MD between 9.5 and 12.5% and GA between 2.6 and 3.0%. This behavior could be attributed to the interaction of GA with fat particles and insoluble material, where the increase in GA provides a greater surface charge (-) in the proximity of the interfaces due to the higher content of tails (non-polar compounds) or polymeric segments of the polysaccharide. The emulsifying properties of GA could allow the absorption at the interface of $SC_{U+GA+MD}$ oil droplets through their protein residues (Babbar *et al.* 2015). In adsorbed macromolecules, the polysaccharide segments are located towards the aqueous phase, due to the presence of carboxylic groups. Meanwhile, the polypeptide chains remain mainly linked like a train to the interface of the oil particles from the seeds. In this way, there is a cooperation that reduces the free energy around the oil droplets and favors the stability of $SC_{U+GA+MD}$

(Tuan Azlan *et al.* 2020). Authors such as Cano-Sarmiento *et al.* (2018) recommend that ζ values in colloidal systems should be on the order of ± 30 mV, to guarantee good physicochemical stability. However, other authors such as Gallón Bedoya *et al.* (2020) suggest a similar effect due to the synergy of ζ (values $< |\pm 30|$ mV) and with the μ of the continuous phase of the colloidal system. The results of ζ found are comparable with those reported by Wan *et al.* (2018) for carrot juice fermented with probiotics, and Gallón Bedoya *et al.* (2020), for a suspension based on cape gooseberry, strawberry, and blackberry.

Particle size. The particle size of food colloidal systems from fruits are indicator associated with phase separation (Dahdouh *et al.* 2018). In $SC_{U+GA+MD}$ a homogeneous dispersion of the particles was observed, with mean values of $D_{[4,3]}$ between 85.1 and 190.0 μm and significant statistical differences ($p < 0.05$) concerning the MD content. This variability is mainly attributed to the combined effect of the applied homogenization conditions and the independent variables considered (MD and GA). In this sense, the TS content of each formulation will be directly related to the particle sizes of $SC_{U+GA+MD}$. The TS provided by U_H as the main raw material is represented by soluble solids (SS) (sugars, acids, soluble fibers, salts, and others) (Mokhtar *et al.* 2018), by the insoluble solids provided mainly by the insoluble fiber, and by the fat content coming from the peel (3.43 g 100 g⁻¹ bs). The U_H had a total fiber content of 185 g 100 g⁻¹ bs, where the insoluble fiber represents approximately 87.6% of the total fiber, corresponding to 162.06 g 100 g⁻¹ bs (Ozturk *et al.* 2017).

The response surface graph (Figure 1d) illustrates the decrease in $D_{[4,3]}$ with the reduction of MD, which is consistent because lower ST in the $SC_{U+GA+MD}$ contributes to a higher shear effect on the particles. This results in better disintegration of the cell membranes during the homogenization time due to lower resistance in the process, leading to an increase in the surface area of the particles and greater particle-particle and particle-aqueous phase interaction. In this context, the OH groups of glucose in MD and protein residues of GA, contained in the aqueous phase, have greater interaction through H_2 bridges, favoring the stability of $SC_{U+GA+MD}$ (Lee *et al.* 2018).

Gallón Bedoya *et al.* (2020) report that in strawberry, blackberry, and cape gooseberry suspensions, smaller particle sizes occur when the total solids of cape gooseberry are low. Greater contribution of solids is represented by fruit seeds with high mechanical resistance and a pectin matrix in their peel. De los Rios *et al.* (2021), reported similar behavior in blackberry suspensions. These authors reported that decreased blackberry solids and hydrocolloids (GA) resulted in a decreased particle size, which was associated with higher μ . Consequently, it can be assumed that particle sizes between 40–100 μm consist of individual cells and cell fragments, while those between 100–125 μm may be small groups of cells, and values above 250 μm may be tissue remnants (Moelants *et al.* 2014).

Total phenols and antioxidant capacity. The TFs in the $SC_{U+GA+MD}$ showed mean values between 58.7–80.6 mg GAE 100 g⁻¹. A

significant effect ($p>0.05$) of the MD variables and the quadratic interaction of MD occurred. The TF behavior in the response surface graph (Figure 1e) shows a curvilinear trend, where the highest contents in $SC_{U+GA+MD}$ are reached with MD concentrations between 12.5–13.5% and throughout the GA range. The variation in TF content in $SC_{U+GA+MD}$ is mainly attributed to two scenarios: 1) to the variation in STs provided by the cape gooseberry in each formulation, which are determined according to the balance of matter and according to the MD and GA concentrations

established by the experimental design and, 2) to the variation in TF of fresh cape gooseberry (control) ($84.1 \pm 5.7 \text{ mg GAE } 100 \text{ g}^{-1} \cong 4.7 \pm 0.3 \text{ mg GAE g}^{-1} \text{ ST}_U$, variability coefficient = 6.8%). Given this situation, the variability coefficients of TF were determined for the 13 experiments, based on the contributions of $\text{mg GAE g}^{-1} \text{ ST}_{Uchuva}$ ($0.4 - 4.5\%$), which corresponded in some experiments to degradation up to 20%. Meanwhile, in other experiments, there was no degradation, probably due to a higher TF content in the U_H than in the control.

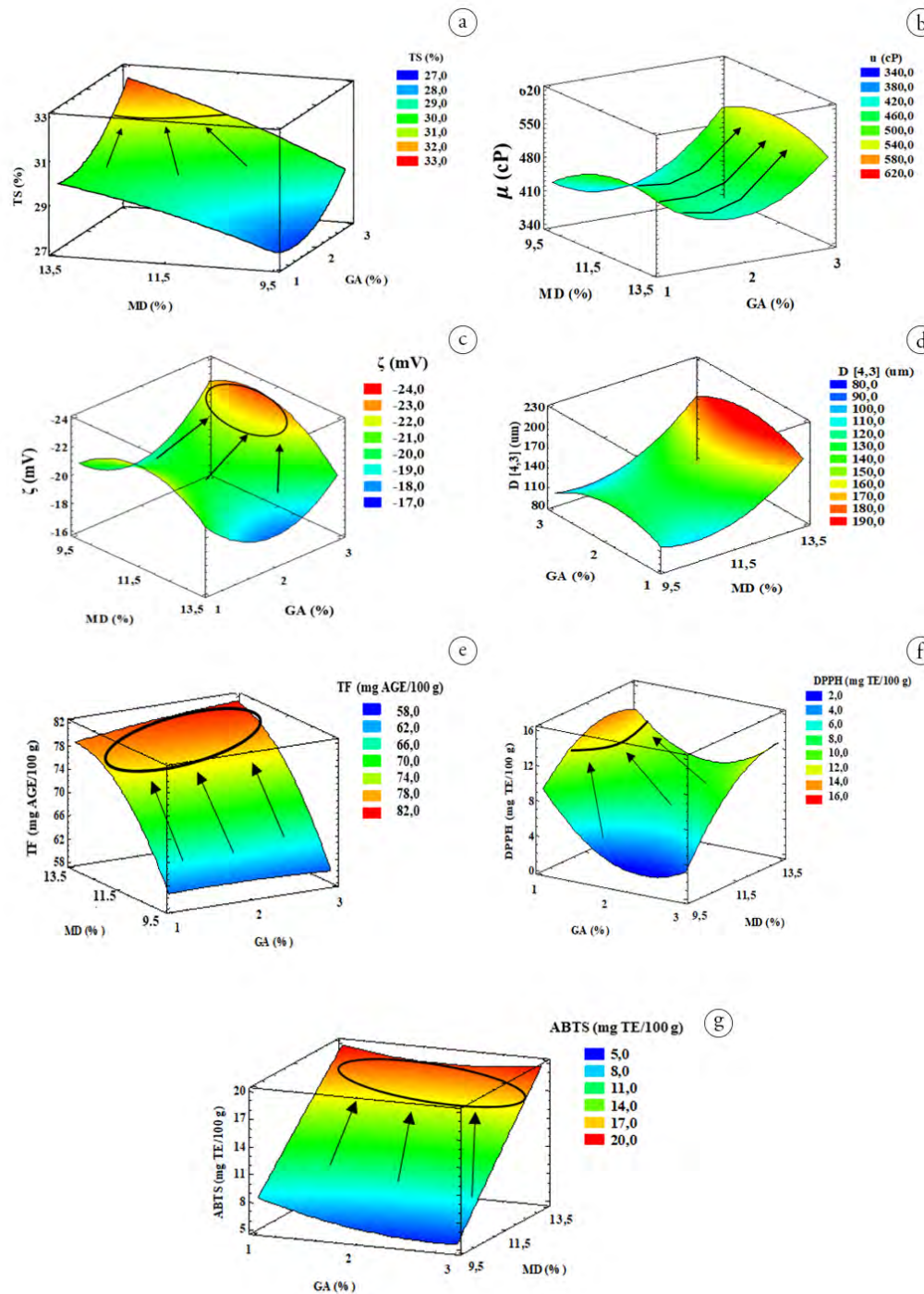


Figure 1. Response surface graphs of variables dependent on the colloidal system of cape gooseberry (pulp, peel, and seeds), gum arabic, and maltodextrin. a) TS (Total solids); b) μ (viscosity); c) ζ (zeta potential); d) $D_{[4,3]}$ (particle size); e) TF (total phenols); f) DPPH (2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl); g) ABTS (2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid)).

The shear homogenization process leads to the degradation of the active components due to the reheating experienced by the matrix. In addition, there is also a greater residual activity of enzymes such as polyphenoloxidase and peroxidase in U_H , since TFs are their substrates (Vega-Gálvez *et al.* 2014; Etzbach *et al.* 2019). In turn, the breakage of cell membranes improves the extraction of TFs and their interaction with MD and GA (Vega-Gálvez *et al.* 2014; Zhu, 2018).

The antioxidant capacity measured by the DPPH and ABTS methods showed statistically significant differences ($p < 0.05$) concerning MD, where its mean values ranged between 2.3-16.7 and 5.2-19.9 mg TE 100^{-1} g $SC_{U+GA+MD}$, respectively. The response surface graphs of both variables (Figures 1 f-g) show the highest contents with formulations whose composition is high in MD (12.5-13.5%) and low in GA (1.0–1.4%). In general, the antioxidant activity behaviors of $SC_{U+GA+MD}$ depend on the variability of the initial contents in the U_H and the degrading effect conferred by the homogenization process applied. However, it can be inferred that there is a protective effect of MD and GA (encapsulants) at the previous concentrations on the active compounds present in the aqueous and lipid phases of $SC_{U+GA+MD}$ (Taheri & Jafari, 2019; Santos Araujo *et al.* 2020), and even exert a protective effect against shear forces and degrading enzymatic processes that occur when breaking the cellular structure (Gallón Bedoya *et al.* 2020).

The research led to the development of a formulation of $SC_{U+GA+MD}$ that fully utilized the fruit's structure (pulp, seed, and peel), positioning it as a sustainable technological alternative. The $SC_{U+GA+MD}$ developed proposes technological alternatives for utilization, which may contribute to value generation in the cape gooseberry agricultural chain. The results obtained allow $SC_{U+GA+MD}$ to be used in the SD micro-encapsulation process. The independent variable with the greatest impact on $SC_{U+GA+MD}$ was MD. However, GA plays an important role in repulsive forces between particles, providing better physical and chemical stability at higher concentrations.

Mathematical modeling and experimental optimization.

Table 2 shows the coefficients of mathematical models for the dependent variables of $SC_{U+GA+MD}$ and their respective R^2 . It is observed that most of the R^2 values for the regression coefficients were not high (38.0–97.3). However, the lack of fit test did not show significant statistical differences ($p > 0.05$) in most of the dependent variables, therefore, they are considered adequate to describe the behavior of the experimental data. Nevertheless, this did not occur for the DPPH, probably due to the different factors that may be affecting $SC_{U+GA+MD}$: harvesting, maturation, mixing, homogenization, and formulation. On the other hand, all dependent variables showed a random distribution of the residuals. This ensures that the data can be parameterized according to a normal distribution and reaffirms that the models are suitable for describing the behavior of the results.

Table 2. Polynomial regression coefficients for the colloidal system surface model of cape gooseberry (pulp, peel, and seeds), gum arabic, and maltodextrin.

Coefficients	TS	μ	ζ	$D_{[4,3]}$	TP	DPPH	ABTS
β_0	17.6	702.3	36.5	91.2	-127.0	-54.8	-14.7
β_A	-4.0	-188.6	6.9	79.1	-2.5	-25.7	-8.4
β_B	1.8	220.9	-11.4	-167.6	30.5	13.9	3.1
β_A^2	0.9	76.9	-2.6	-24.9	-0.4	3.9	0.9
B_{AB}	0.1	-7.5	0.3	1.6	0.4	0.7	0.3
β_B^2	-0.1	-8.9	0.5	7.9	-1.1	-0.6	-0.02
R^2	70.6	40.5	38.0	61.3	97.3	61.7	91.6
lack of fit (p-value)	0.3379	0.4585	0.0829	0.6524	0.1204	0.0471*	0.9876

Table 3 shows the experimental optimization of multiple responses for $SC_{CG+GA+MD}$, where different criteria were established to identify the most physicochemically stable formulation and the one with the greatest antioxidant activity: maximize TS, μ , TP, DPPH, ABTS; and minimize: ζ and $D_{[4,3]}$. In addition, weights and impacts were defined in the experimental optimization, and the experimental validation of $SC_{U+GA+MD}$ was carried out through the calculation of the experimental mean error (RME), comparing the results of the dependent variables according to the model with those obtained experimentally under the optimal condition. The optimization showed a desirability of 72.0%. The independent variables were MD of 12.3% and GA of 330%. Other researchers have optimized

colloidal systems based on the desirability, reporting the following results: 69.1% in a blackberry suspension with probiotics (Marín-Arango *et al.* 2019) and 74.3% in banana juice (Handique *et al.* 2019). It is observed that the majority of the dependent variables (TS, μ , ζ , DPPH, and ABTS) showed RME values less than 12.9%, which is acceptable and allows for validating the mathematical models. Variables $D_{[4,3]}$ and TP showed values greater than 20%, which is the consequence of the different factors mentioned above. However, it is highlighted that the experimental values contribute to better physicochemical stability and antioxidant activity, being better than those obtained by their mathematical models.

Table 3. Experimental optimization of multiple responses for the colloidal system of cape gooseberry (pulp, peel, and seeds), gum arabic, and maltodextrin.

Dependent Variable	Criterion	Weight	Impact	Theoretical Optimal	Experimental Value	RME* (%)
TS (%)	Maximize	1.0	5.0	31.8	32.2 ± 0.1	1.3
μ(cP)	Maximize	0.5	4.0	549.2	581.0 ± 7.8	5.8
ζ (mV)	Minimize	1.0	5.0	-22.6	-22.6 ± 0.6	0.0
D _[4,3] (μm)	Minimize	1.0	5.0	128.4	77.9 ± 2.0	39.3
TF (mg GAE/100 g)	Maximize	1.0	5.0	78.8	97.2 ± 1.1	23.4
DPPH (mg TE/100 g)	Maximize	1.0	5.0	11.8	12.6 ± 1.4	6.8
ABTS (mg TE/100 g)	Maximize	1.0	5.0	15.5	13.5 ± 0.6	12.9

*RME: Relative Mean Error.

Experimental optimization enabled the determination of the most appropriate formulation for SC_{U+GA+MD}. Additionally, the experimental validation ensured an acceptable prediction of the dependent variables.

Acknowledgments. The authors thank the Ministerio de Ciencia Tecnología e Innovación - Minciencias, the Sistema General de Regalías of the Department of Antioquia, the Universidad Nacional de Colombia, Medellín Campus, Proexcar S.A.S, and the Government of the Department of Nariño. Additionally, the authors thank to Fondo Nacional de Financiamiento para la Ciencia, Tecnología y la Innovación Francisco José de Caldas for the financial support for the translation of this article through the project “Propuesta fortalecimiento gestión editorial de revistas científicas de la Universidad de Ciencias Aplicadas U.D.C.A 2023-2024”. **Conflicts of interest:** The manuscript was prepared and revised with the participation of all authors, who declare that no conflict of interest would jeopardize the validity of the results presented. **Funding:** Minciencias, SGR, and the Government of the Department of Nariño. **Authors’ contribution:** Soany Eraso-Grisales: conceptualization, development, and design of methodology, conducting the experiments and data collection, data analysis and application of statistical techniques, writing the manuscript. Misael Cortés-Rodríguez: conceptualization, acquisition of financing, development, and design of methodology, data analysis and application of statistical techniques, review and editing the manuscript. Andrés Hurtado-Benavides: Data analysis and application of statistical techniques, review and editing the manuscript.

REFERENCES

ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS-AOAC. 2012. Official methods of analysis. En: Helrich, K. (ed.). 19 edición. AOAC. Arlington.

BABBAR, N.; AGGARWAL, P.; OBEROI, H.S. 2015. Effect of addition of hydrocolloids on the colloidal stability of litchi (*Litchi chinensis* Sonn) juice. Journal of Food Processing and Preservation. 39(2):183-189. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12220>

CANO-SARMIENTO, C.; TÉLLEZ-MEDINA, D.I.; VIVEROS-CONTRERAS, R.; CORNEJO-MAZÓN, M.; FIGUEROA-HERNÁNDEZ, C.Y.; GARCÍA-ARMENTA, E.; ALAMILLA-BELTRÁN, L.; GARCÍA, H.S.; GUTIÉRREZ, G.F. 2018. Zeta potential of food matrices. Food Engineering Reviews. 10(3):113-138. <https://doi.org/10.1007/s12393-018-9176-z>

DAHDOUH, L.; DELALONDE, M.; RICCI, J.; RUIZ, E.; WISNEWSKI, C. 2018. Influence of high shear rate on particle size, rheological behavior and fouling propensity of fruit juices during crossflow microfiltration: Case of orange juice. Innovative Food Science and Emerging Technologies. 48:304-312. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.07.006>

DAHDOUH, L.; WISNIEWSKI, C.; RICCI, J.; VACHOUD, L.; DORNIER, M.; DELALONDE, M. 2016. Rheological study of orange juices for a better knowledge of their suspended solids interactions at low and high concentrations. Journal of Food Engineering. 174:15-20. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.11.008>

DE LOS RIOS, C.; CORTÉS RODRÍGUEZ, M.; ARANGO TOBÓN, J.C. 2021. Physicochemical quality and antioxidant activity of blackberry suspensions: Compositional and process effects. Journal of Food Processing and Preservation. 15498:1-11. <https://doi.org/10.1111/jfpp.15498>

ETZBACH, L.; PFEIFFER, A.; SCHIEBER, A.; WEBER, F. 2019. Effects of thermal pasteurization and ultrasound treatment on the peroxidase activity, carotenoid composition, and physicochemical properties of goldenberry (*Physalis peruviana* L.) puree. LWT - Food Science and Technology. 100:69-74. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.10.032>

ETZBACH, L.; PFEIFFER, A.; WEBER, F.; SCHIEBER, A. 2018. Characterization of carotenoid profiles in goldenberry (*Physalis peruviana* L.) fruits at various ripening stages and in different plant tissues by HPLC-

- DAD-APCI-MSⁿ. Food Chemistry. 245:508–517. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.10.120>
- GALLÓN BEDOYA, M.; CORTÉS RODRÍGUEZ, M.; GIL, J.H. 2020. Physicochemical stability of colloidal systems using the cape gooseberry, strawberry, and blackberry for spray drying. Journal of Food Processing and Preservation. 44(9):1-10. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14705>
- GUEVARA COLLAZOS, A.; VILLAGRAN MUNAR, E.; VELASQUEZ AYALA, F.; GONZÁLEZ VELANDIA, K. 2019. Evaluación del comportamiento poscosechade uchuva provenientes de sistemas de producción convencionales y agroecológicos. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. 10(6):1273-1285. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i6.1492>
- HANDIQUE, J.; BORA, S.J.; SIT, N. 2019. Optimization of banana juice extraction using a combination of enzymes. Journal of Food Science and Technology. 56(8):3732-3743. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03845-z>
- INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN - ICONTEC. 1999. Norma técnica Colombiana – NTC 4580. Frutas fresas. Uchuva. Especificaciones. Icontec. Bogotá, D.C., Colombia. 17p. Disponible desde Internet en: <https://tienda.icontec.org/gp-frutas-frescas-uchuvas-especificaciones-del-empaquetamiento-5166-2003.html>
- ISLAM SHISHIR, M.R.; CHEN, W. 2017. Trends of spray drying: A critical review on drying of fruit and vegetable juices. Trends in Food Science and Technology. 65:49-67. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.05.006>
- LEE, J.K.M.; TAIP, F.S.; ABDULLAH, Z. 2018. Effectiveness of additives in spray drying performance: a review. Food Research. 2(6):486-499. [https://doi.org/10.26656/fr.2017.2\(6\).134](https://doi.org/10.26656/fr.2017.2(6).134)
- MARÍN-ARANGO, Z.T.; CORTES-RODRÍGUEZ, M.; MONTOYA-CAMPUZANO, O.I.; ARANGO-TOBÓN, J.C. 2019. Viability of *Lactobacillus casei* ATCC 393 and properties in andean blackberry suspensions with probiotic and prebiotic characteristics. Revista DYNA. 86(210):179-186. <https://doi.org/10.15446/dyna.v86n210.72929>
- MATUSIAK, J.; GRZĄDKA, E. 2017. Stability of colloidal systems - a review of the stability measurements methods. Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska, Sectio AA – Chemistry. 72(1):33-45. <https://doi.org/10.17951/aa.2017.72.1.33>
- MOELANTS, K.R.N.; CARDINAELS, R.; VAN BUGGENHOUT, S.; VAN LOEY, A. M.; MOLDENAERS, P.; HENDRICKX, M.E. 2014. A Review on the relationships between processing, food structure, and rheological properties of plant-tissue-based food suspensions. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 13(3):241-260. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12059>
- MOKHTAR, S.M.; SWAILAM, H.M.; EMBABY, H.E.S. 2018. Physicochemical properties, nutritional value and techno-functional properties of goldenberry (*Physalis peruviana*) waste powder concise title: Composition of goldenberry juice waste. Food Chemistry. 248:1-7. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.11.117>
- OLIVARES-TENORIO, M.L.; DEKKER, M.; VERKERK, R.; VAN BOEKEL, M.A.J.S. 2016. Health-promoting compounds in cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.): Review from a supply chain perspective. Trends in Food Science and Technology. 57(Part A):83-92. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.09.009>
- OZTURK, A.; ÖZDEMİR, Y.; ALBAYRAK, B.; ŞİMŞEK, M.; YILDIRIM, K.C. 2017. Some nutrient characteristics of goldenberry (*Physalis Peruviana* L.) cultivar candidate from Turkey. Scientific Papers Series B Horticulture. 61:293-297.
- PETKOVA, N.T.; POPOVA, V.T.; IVANOVA, T.A.; MAZOVA, N.N.; PANAYOTOV, N.D.; STOYANOVA, A. 2021. Nutritional composition of different cape gooseberry genotypes (*Physalis peruviana* L.) – a comparative study. Food Research. 5(4):191-202.
- PIORKOWSKI, D.T.; MCCLEMENTS, D.J. 2014. Beverage emulsions: Recent developments in formulation, production, and applications. Food Hydrocolloids. 42:5-41. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2013.07.009>
- SAAVEDRA-LEOS, M.; LEYVA-PORRAS, C.; ALVAREZ-SALAS, C.; LONGORIA-RODRÍGUEZ, F.; LÓPEZ-PABLOS, A.L.; GONZÁLEZ-GARCÍA, R.; PÉREZ-URIZAR, J. 2018. Obtaining orange juice-maltodextrin powders without structure collapse based on the glass transition temperature and degree of polymerization. CyTA - Journal of Food. 16(1):61-69. <https://doi.org/10.1080/19476337.2017.1337048>
- SANG-NGERN, M.; YOUN, U.J.; PARK, E.J.; KONDRATYUK, T.P.; SIMMONS, C.J.; WALL, M.M.; RUF, M.; LORCH, S.E.; LEONG, E.; PEZZUTO, J.M.; CHANG, L.C. 2016. Withanolides derived from *Physalis peruviana* (Poha) with potential anti-inflammatory activity. Bioorganic and Medicinal Chemistry Letters. 26(12):2755–2759. <https://doi.org/10.1016/j.bmcl.2016.04.077>
- SANTOS ARAUJO, H.C.; JESUS, M.S.; LEITE NETA, M.T.S.; GUALBERTO, N.C.; MATOS, C.M.S.; RAJAN, M.; RAJKUMAR, G.; NOGUEIRA, J.P.; NARAIN, N. 2020. Effect of maltodextrin and gum

- arabic on antioxidant activity and phytochemical profiles of spray-dried powders of sapota (*Manilkara zapota*) fruit juice. *Drying Technology*. 39(3):392-404. <https://doi.org/10.1080/07373937.2020.1839487>
- SANTOS, D.; MAURÍCIO, A.C.; SENCADAS, V.; SANTOS, J.D.; FERNANDES, M.H.; GOMES, P.S. 2017. Spray drying: An Overview. En: Pignatello, R.; Musumeci, T. (eds). *Biomaterials - Physics and chemistry*. New Edition. InTechOpen. p.9-35. <https://doi.org/10.5772/intechopen.72247>
- TAHERI, A.; JAFARI, S.M. 2019. Gum-based nanocarriers for the protection and delivery of food bioactive compounds. *Advances in colloid and interface Science*. 269:277-295. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2019.04.009>
- TAMNAK, S.; MIRHOSSEINI, H.; TAN, C.P.; GHAZALI, H.M.; MUHAMMAD, K. 2016. Physicochemical properties, rheological behavior and morphology of pectin-pea protein isolate mixtures and conjugates in aqueous system and oil in water emulsion. *Food Hydrocolloids*. 56:405-416. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.12.033>
- TUAN AZLAN, T.N.N.; HAMZAH, Y.; MOHD ABD MAJID, H.A. 2020. Effect of gum arabic (*Acacia senegal*) addition on physicochemical properties and sensory acceptability of roselle juice. *Food Research*. 4(2):449-458. [https://doi.org/10.26656/fr.2017.4\(2\).293](https://doi.org/10.26656/fr.2017.4(2).293)
- VEGA-GÁLVEZ, A.; LÓPEZ, J.; TORRES-OSSANDÓN, M.J.; GALOTTO, M.J.; PUENTE-DÍAZ, L.; QUISPE-FUENTES, I.; DI SCALA, K. 2014. High hydrostatic pressure effect on chemical composition, color, phenolic acids and antioxidant capacity of Cape gooseberry pulp (*Physalis peruviana* L.). *LWT-Food Science and Technology*. 58(2):519-526. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.04.010>
- WAN, Y.J.; XU, M.M.; GILBERT, R.G.; YIN, J.Y.; HUANG, X.J.; XIONG, T.; XIE, M.Y. 2018. Colloid chemistry approach to understand the storage stability of fermented carrot juice. *Food Hydrocolloids*. 89:623-630. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.11.017>
- WARDY, W.; PUJOLS MARTÍNEZ, K.D.; XU, Z.; NO, H.K.; PRINYAWIWATKUL, W. 2014. Viscosity changes of chitosan solution affect physico-functional properties and consumer perception of coated eggs during storage. *LWT - Food Science and Technology*. 55(1):67-73. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2013.07.013>
- ZHU, D.; SHEN, Y.; WEI, L.; XU, L.; CAO, X.; LIU, H.; LI, J. 2020. Effect of particle size on the stability and flavor of cloudy apple juice. *Food Chemistry*. 328:126967. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126967>
- ZHU, F. 2018. Interactions between cell wall polysaccharides and polyphenols. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 58(11):1808-1831. <https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1287659>



Comparison of consumer perception of Colombian and Mexican blueberries (*Vaccinium corymbosum* L. cv. Biloxi)

Comparación de la percepción de los consumidores sobre los arándanos (*Vaccinium corymbosum* L. cv. Biloxi) colombianos y mexicanos

Jessica Rubiano-Moreno^{1*} ; Violeta Corona^{2,3} ; Alejandro Rodríguez-Magaña⁴ ; Purificación García-Segovia⁵

¹Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales, Facultad de Ciencias Administrativas y Comerciales. Bogotá D.C., Colombia. e-mail: jesrubiano@udca.edu.co

²Universidad Panamericana, Escuela de Ciencias Económicas y Empresariales. Guadalajara, Jalisco-Mexico. e-mail: vcorona@up.edu.mx

³Universitat Politècnica de València, Business Management Department. Valencia, Valencia Spain

⁴Universidad Panamericana, Escuela de Ciencias Económicas y Empresariales. Zapopan, Jalisco-México. e-mail: arodrigu@up.edu.mx

⁵Universitat Politècnica de València, Food Technology Department. Valencia, Valencia-Spain; e-mail: pugarse@tal.upv.es

*corresponding author: jesrubiano@udca.edu.co

How to cite: Rubiano-Moreno, J.; Corona, V.; Rodríguez-Magaña, A.; García-Segovia, P. 2024. Comparison of consumer perception of Colombian and Mexican blueberries (*Vaccinium corymbosum* L. cv. Biloxi). Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 27(2):e2199. <http://doi.org/10.31910/rudca.v27.n2.2024.2199>

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 for High Quality by the Ministry of National Education.

Received: May 30, 2024.

Accepted: October 3, 2024.

Edited by: Helber Adrián Arévalo Maldonado.

ABSTRACT

Consumers often associate their flavor preferences with the origin of foods and beverages; however, these distinctions are not always considered when such products are exported. This research presents the findings of a study designed to evaluate cross-cultural differences in the perceptions of Mexican and Colombian consumers regarding the organoleptic characteristics of the biloxi blueberry variety, grown in both Mexico and Colombia. For this purpose, an experimental study was conducted based on a questionnaire in which 397 consumers from both countries assessed different sensory attributes of two samples: one grown in Mexico and the other in Colombia, both belonging to the biloxi variety. In addition, a biometric test was performed to detect facial microexpressions to complement the results of the experiment with indicators of emotional valence. The study demonstrated that certain correspondences between organoleptic properties are consistent in both cultures. Specifically, in both nationalities a significant effect is evident in acidity, bitterness, and sweetness. The Colombian blueberry was perceived as sweeter, while the Mexican blueberry was evaluated as more bitter and sour. Similarly, it was found that when the blueberry evaluated was rated as more acidic, the overall flavor rating was lower. These results are relevant for blueberry producers, traders, and exporters, knowing that the sweeter varieties will be the most accepted by Colombian and Mexican consumers.

Keywords: Emotion measurement; Country of origin; Sensory characterization by consumers; Sensory quality; Sensory science.

RESUMEN

Los consumidores suelen asociar sus preferencias con sabores específicos según la procedencia de los alimentos y bebidas; sin embargo, no siempre se consideran estas diferencias cuando se exportan dichos alimentos. Esta investigación presenta los resultados de un estudio diseñado para evaluar diferencias interculturales en la percepción de los consumidores mexicanos y colombianos de características organolépticas (gusto general, frescura, intensidad de color, intensidad de aroma, acidez) entre el arándano cultivar biloxi cultivado en México y Colombia. Se diseñó un estudio experimental basado en un cuestionario en el que 397 consumidores de ambos países (192 en México, 205 en Colombia) evaluaron distintos atributos sensoriales de dos muestras: un arándano mexicano y uno colombiano, ambos de la variedad biloxi. Adicionalmente, se realizó un análisis de microexpresiones faciales para complementar los resultados del experimento con indicadores de valencia emocional. Se demostró que ciertas correspondencias entre las propiedades organolépticas son consistentes en ambas culturas. Específicamente, en ambas nacionalidades, se evidencia un efecto significativo en los atributos acidez, amargura y dulzura. El arándano colombiano fue percibido más dulce, mientras que el arándano mexicano fue evaluado como más amargo y ácido. Cuando el arándano evaluado fue clasificado como más ácido, la calificación de gusto general fue más baja. Estos resultados son relevantes para los productores, comercializadores y exportadores de arándanos, sabiendo que aquellas variedades más dulces serán las que tendrán mayor aceptación por parte de los consumidores colombianos y mexicanos.

Palabras clave: Calidad sensorial; Caracterización sensorial por los consumidores; Ciencia sensorial; Medición de la emoción; País de origen.

INTRODUCTION

Various experts have delved into how people relate to the food and beverages they consume (Kaneda *et al.* 2000; Piqueras-Fiszman *et al.* 2012; Faye *et al.* 2013; Velasco *et al.* 2013; Reinoso Carvalho *et al.* 2015; Velasco *et al.* 2015; Wang *et al.* 2015; Spence, 2017). Although the definition of food flavor starts from a purely organoleptic perspective, it is necessary to have a broader vision of how people perceive food, considering all the associations that are assigned to flavors based on experience and learning (Gilbert *et al.* 2014). These associations undoubtedly have an emotional connotation (Cardello *et al.* 2012).

Emotions are made up of subjective feelings, cognitions, and physiological responses that assign value to an experience (Jonaskaite *et al.* 2020). Some scientists have concluded that the recognition of emotions is universal; that is, regardless of where people were born or raised, it is possible for anyone to recognize facial expressions associated with an emotional state (Ekman & Friesen, 1971; Barrett, 2017). According to Ekman's theory, there is one facial expression to reflect positive emotion (happiness), one expression for neutral emotion (surprise), and five expressions for negative emotion (fear, anger, sadness, disgust, and contempt) (Ekman, 2003).

It is possible that the universal tendencies to associate some flavors with certain emotions are more modulated by the characteristic flavors of each culture than by the sensory characteristics of foods. For example, traditional Mexican cuisine is known to have made use of edible flowers for centuries and probably even millennia (Mulík & Ozuna, 2020).

Blueberries have great potential in the food product market (Hoke *et al.* 2017) due to the increased consumption of fruits that provide vitamins, minerals, and antioxidants to improve the immune system (Yue & Wang, 2017; Lagunes-Fortiz *et al.* 2020). This fruit has several advantages, such as its low caloric content, ideal for diets, its slow maturation, and that it can be kept refrigerated (Konarska, 2015; Romo-Muñoz *et al.* 2019).

In 2016, 650 tons of blueberries were produced in Colombia; for 2018 and 2019, this figure increased to 1,850 tons, showing a growth of 185%. In Mexico, in 2016, 17,100 tons were registered, and in 2018 and 2019, it amounted to 48,600 and 53,670 tons, respectively. The most noticeable growth in Latin America was obtained by Peru, with a production of 125,404 tons in 2019; production increased 44,504.13 tons compared to 2018 (Ghezzi *et al.* 2021).

When evaluating the yield measured in metric tons per hectare, in both Mexico and Colombia, there was a significant decrease of 4.8% and 35.9%, respectively. In general, most Latin American countries suffered considerable reductions; however, in other South American countries, there was an increase from 0 to 6 tons per hectare (tm/ha), showing that more and more countries are entering the production of blueberries. In addition, the United States and

Canada show favorable figures in this regard, with percentages of 22.2% and 22.5%, which is why their numbers have been significant in the other aspects already evaluated (Tinoco-Plasencia *et al.* 2023).

Sensory quality is captured by the senses and is that which makes a food palatable or rejectable; it is the first factor in selecting a food. It includes the characteristics of smell, color, taste, texture, chewing sensation, and temperature, among others (Cheng *et al.* 2020). Sensory perception is carried out by means of electrical impulses, which are transmitted from the point of reception of the stimulus to the central nervous area.

Later the impulse is sent to the brain where the sensation is correlated and defined: a) the eye checks the appearance, shape, size, density, physical deterioration, and color, mainly; b) smell is stimulated by volatile (aromatic) substances, which are perceived when they are transmitted through the air. The primary elements of odors are intensity, type, and variety. Smell helps to distinguish if a food is spoiled. An ordinary person captures around 200 different smells, while a gourmet can detect more than 5000, and c) taste is basically perceived by the mouth, specifically in the taste buds of the tongue. The tongue can detect five basic tastes (sweet, sour, salty, bitter, and umami) (Motoki *et al.* 2022).

The US Food Institute (IFT) defines sensory evaluation as “the scientific discipline used to evoke, measure, analyze, and interpret the reactions to those characteristics of food and other substances, which are perceived by the senses of sight, smell, taste, touch and hearing” (Stone, 2012).

It can also be defined as the analysis of food or other materials through the senses. Another concept that is given to sensory evaluation is the characterization and analysis of acceptance or rejection of food by the taster or consumer, according to the sensations experienced from the moment they observe it and after they consume it. It is necessary to consider that these perceptions depend mainly on the individual, on space and time (Baños Ardavín *et al.* 2014).

Studies of sensory perception (organoleptic) in agribusiness are essential for international trade because they allow the evaluation of the characteristics of food products, such as flavor, aroma, texture, and appearance, factors that directly influence consumer preference and its acceptance in global markets (Greis *et al.* 2021).

This study will allow us to identify which attributes of quality control must be maintained in production to satisfy the consumer. It will also allow you to establish if there are cultural preferences in blueberry consumption and, in this way, adjust the characteristics of the blueberries to tastes (Rivera *et al.* 2022).

Sensory perception studies in agribusiness are essential to ensure the success of a product in international trade, improving its acceptance, quality, competitiveness, and ability to meet the expectations and regulations of different global markets.

Therefore, the purpose of this work was to evaluate the sensory perception of Mexican and Colombian consumers of the same blueberry variety, whose only difference is its origin (Mexico and Colombia). The results of the consumer's sensory characterization were compared with the laboratory analysis.

MATERIALS AND METHODS

The research procedure is presented in three phases. The first phase consisted of the construction of the theoretical framework that allowed clarify the concepts that were analyzed in the study. The point of view was established from the different disciplines. In the second phase, the methodology was proposed to collect and analyze the data that would serve to do the empirical research of the study.

Experiment. This research includes a cross-sectional experimental design (Hernández Sampieri *et al.* 1991). The type of study is descriptive and inferential, and the information was collected through surveys (Montero & León, 2002), with questions containing ordinal measurement levels. The selection of the sample was non-probabilistic, where the selection criteria were: (1) being between 18 and 45 years old and (2) having previously consumed blueberries. The experiment was applied to 397 people. The participants were part of the databases of two universities.

The purpose of this research is to assess if there are differences between the perception of consumers regarding Mexican and Colombian blueberries, considering variables such as smell, taste, color (criterion variable), and the origin of the blueberry (treatment factor), taking into account that the quality of the blueberry fruit varies according to the abiotic (soil, climate, water) and biotic conditions, and the cultivation practices of the two countries (Cortés-Rojas *et al.* 2016). The error control design that was proposed for this experiment is crossover so that the same consumer tests the two treatments at random. The statistical model is presented in equation 1.

$$\text{Preference}_{ijt} = \mu + \text{Blueberry}_i + \text{Lot}_j + \text{Time}_t + \varepsilon_{ijt} \quad \text{equation 1}$$

where $i = 1, 2; j = 1, \dots, 397; t = 1, 2$.

Preference_{ijt} is the rating of the attribute blueberry when applying the i -th treatment in the j -th individual.

μ is the overall mean rating preference regardless of treatment applied.

Blueberry_i is the effect of the treatment

Lot_j is the group effect

Time_t is the effect of the order in which the treatment was applied

ε_{ijt} is the random variable error associated with the j -th experimental unit of the i -th treatment. Assuming normality with zero mean, independence, and homogeneity of variance.

The data were analyzed by means of both one-way ANOVA as implemented in the SPSS v18 statistics package, with the between-subjects factors of blueberry variety (Colombian and Mexican blueberry) and the within-subjects factor of liking level of the blueberry tasted (visual analogue scale: 0 = not at all, 10 = very much).

To contrast the results of the experiment with the physical characteristics of the blueberries, a bromatological study was carried out on the blueberries consumed by the participants in the Nutrition Laboratory of the Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales. The physicochemical determinations that were made in both fresh matter and dried fruit following the AOAC (2000) methods were: moisture, total protein, ethereal extract, crude fiber, ash, pH, tannins, total carbohydrates, gross energy, brix degrees. To carry out this study, a sample of 500 grams of blueberries from each region (Colombia and Mexico). The fruits used from the two countries had a similar harvest time to guarantee that the comparison of the characteristics maintained the same conditions.

Neuromarketing. Finally, a neuromarketing study was carried out to determine consumers' expressions when tasting the two types of blueberries. To collect the information, a personal survey format was used, with 36 questions, eight of which were closed questions and 28 scale questions (0 to 10) to evaluate the attributes of blueberries.

For the application of the experiment, we worked with groups of 10 people to assign the treatments randomly. The blueberries were placed in plastic jars with a sticker to identify which blueberry it was (WZP, Mexican blueberry and RTY, Colombian blueberry). Later, as the study participants entered, they were given the questionnaire and the order in which they should taste the blueberries. To clean the palate, they were offered soda crackers and water. Additionally, an analysis of facial micro-expressions was made, where the same procedure was followed, but the form was filled out on a computer.

For the facial micro-expressions experiment, 64 participants were examined (33 from Colombia and 31 from Mexico), representing a sample of university students and professors aged 18 - 44 years who agreed to participate in the experiment during the term (41 female; MAge = 24.03 years, SDAge = 7.10). The participants gave their consent to scan their faces before performing the experiment. The consent was in accordance with the guidelines established by the current Neuromarketing Science and Business Association code of ethics (NMSBA, 2022). First, the procedure was explained. Then, when the participant was in front of a computer that recorded their face, a baseline was established to determine the initial emotional state of the participant. The participant followed a sensory rinse procedure with water and crackers before tasting the two blueberries whose tasting order was established randomly. After tasting each blueberry, participants were asked to rate (1) overall liking, (2) freshness, (3) color intensity, (4) aroma intensity, (5) acidity and (6) tartness on a visual analog scale. The iMotions's Survey module (Version 8.1) was programmed for that purpose. Finally, the participant had to repeat the experiment with the next blueberry,

and then the test was finished. This study took approximately 7.7 minutes to complete for each participant.

iMotions's Emotion FACET module (Version 8.1) was used to identify the emotions that each participant experienced when tasting the blueberries (Colombian and Mexican) and to compare if there was a correlation between the emotion experienced and the assessment, they gave of how much they liked the blueberry they had just tasted. We ran iMotions on a Dell Latitude 3550 T450s with Windows 10. Standard settings, as described in the iMotions manual, were used. iMotions provides the percentage of time each basic emotion was experienced: joy, anger, contempt, disgust, fear, sadness, and surprise. For each participant, iMotions establishes a valence parameter (pleasantness) to determine whether the subconscious reaction in relation to a positive or negative emotional state is correlated with emotional expressions on the face

that are recognizable by FACET facial analysis system. The valence time percentage allows classifying basic emotions, such as anger and disgust (negative valence) or joy and surprise (positive valence) (iMotions, 2021).

RESULTS AND DISCUSSION

Of the blueberries used for the consumption test, 500 grams of fruit from Mexican and Colombian were randomly chosen to perform laboratory tests and determine their characteristics. Table 1 shows that fresh Mexican blueberries have higher moisture, protein, and tannins compared to Colombian blueberries. Regarding pH, Colombian blueberries have a higher value, which makes them less acidic, this is consistent with the brix degrees that show that the Colombian fruit is sweeter.

Table 1. Laboratory results of the bromatology study of blueberry fruit from Colombia and Mexico (proximal, crude energy, tannins, pH).

Description: Blueberry Fruit	% FRESH FRUIT													
	No. lab	H	PT	EE	FC	C	ENN	CHO TOT	MO	EB Kcal/100 g	TAN TOT	MS	pH	Brix%
Origin: Chocontá, Colombia.	6427	82.06	0.67	0.20	0.97	0.22	15.88	16.85	17.72	77.7	188	17.94	3.89	13.8
Origin: Guadalajara, Mexico.	6428	84.71	0.84	0.17	1.25	0.31	12.72	13.97	14.98	67.9	244	15.29	3.08	12.4

Description: Blueberry Fruit	% DRY BASE (100% DRY MATTER)									
	No. lab	PT	EE	FC	C	ENN	CHO TOT	MO	EB Kcal/100 g	TAN TOT
Origin: Chocontá, Colombia.	6427	3.73	1.11	5.41	1.23	88.52	93.93	98.77	433	1048
Origin: Guadalajara, Mexico.	6428	5.49	1.11	8.18	2.03	83.19	91.37	97.97	444	1596

H = Humidity; PT = Total protein; EE = Ethereal Extract (Crude Fat); FC = Crude fiber; C = Ash; ENN = non-nitrogenous extract (Soluble carbohydrates); CHO TOT = Total carbohydrates; MO = Organic matter; EB = gross energy; TAN TOT = Total tannins; MS = Dry matter.

Experiment results. In Mexico, the experiment was carried out with 192 participants, of whom 53% were women and 43% were men, with an average age of 20 years. As can be seen in figure 1a. Mexican consumers perceive a marked difference in acidity between Colombian and Mexican blueberries. Additionally, other attributes that present relevant differences are sweetness and tartness.

In Colombia, 205 individuals participated in the experiment; 66% were women and 34% were men, with an average age of 23 years and an average consumption frequency of 3.2. As well as Mexican consumers, Colombians perceive a difference between Colombian and Mexican blueberries in terms of acidity, tartness, and sweetness, as presented in figure 1b. The results are consistent with laboratory tests performed.

Neuromarketing results. The analysis of variances was carried out with the 14 attributes. A significant effect is evidenced in the attributes of acidity, tartness, and sweetness when Mexican and Colombian blueberries are compared, and secondary attributes that may have an effect are grittiness, odor, and ripeness.

In the case of acidity, a significant difference is found by gender ($p = .04$), nationality ($p = .0002$), and variety of blueberry ($p = <2e-16$). Considering the laboratory analysis and the experiment, it is evident that the Mexican blueberry is more acidic than the Colombian blueberry. This is perceived by all consumers, although women notice it more easily, as presented in figure 2a.

For the tartness attribute only one level of significance is generated in the blueberry variety ($p = <2e-16$), and when observing figure 2b it is evident that the Mexican blueberry is rated as tarter by all consumers. When evaluating sweetness, it was found that only the blueberry variety is significant ($p = <2e-16$), which is consistent with the results shown in table 1 about brix degrees since it is evident that Colombian blueberries are sweeter than Mexican ones. This characteristic is identified by all consumers, as presented in figure 2c.

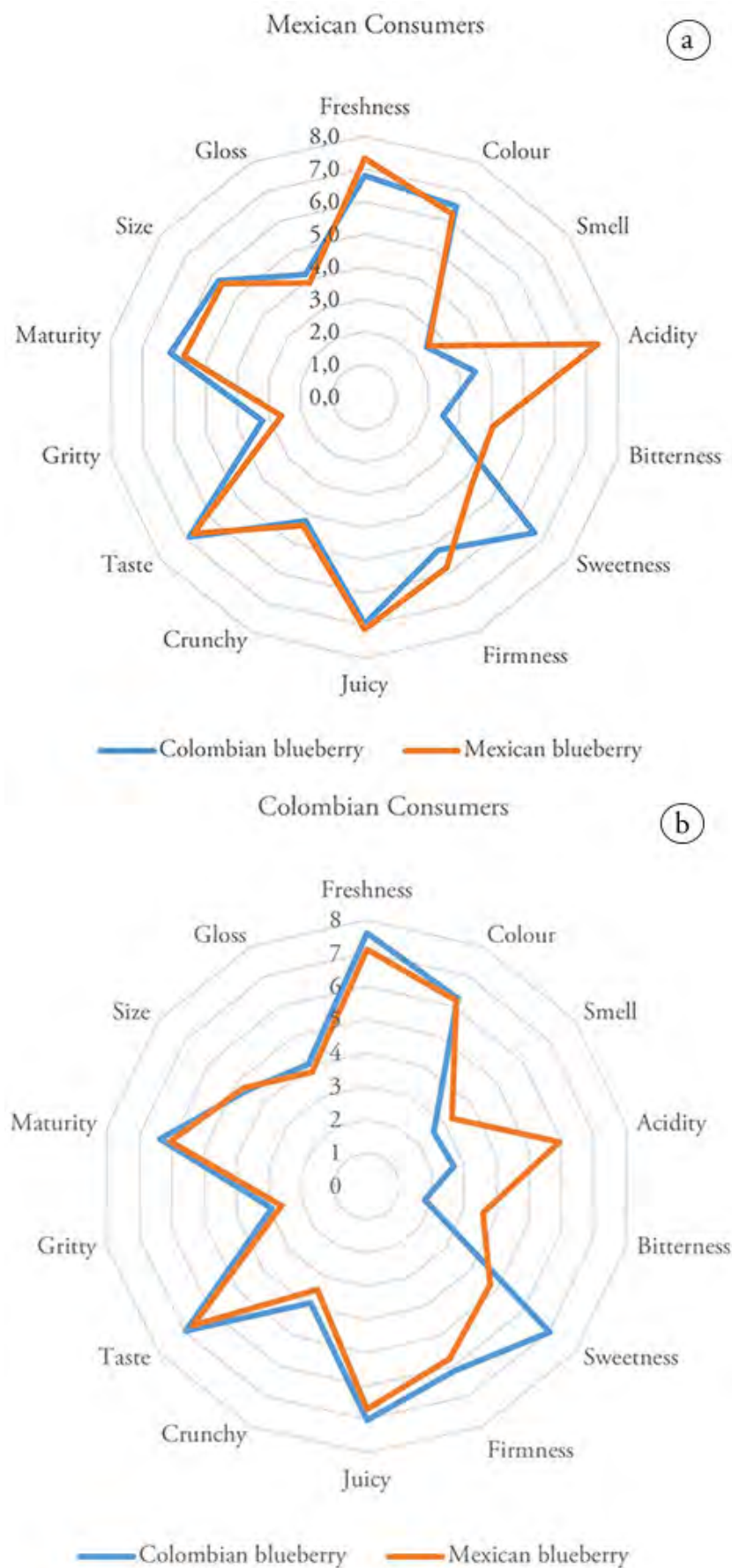


Figure 1. Rating of attributes of blueberry fruits from Mexico and Colombia. a) Mexican consumers; b) Colombian consumers

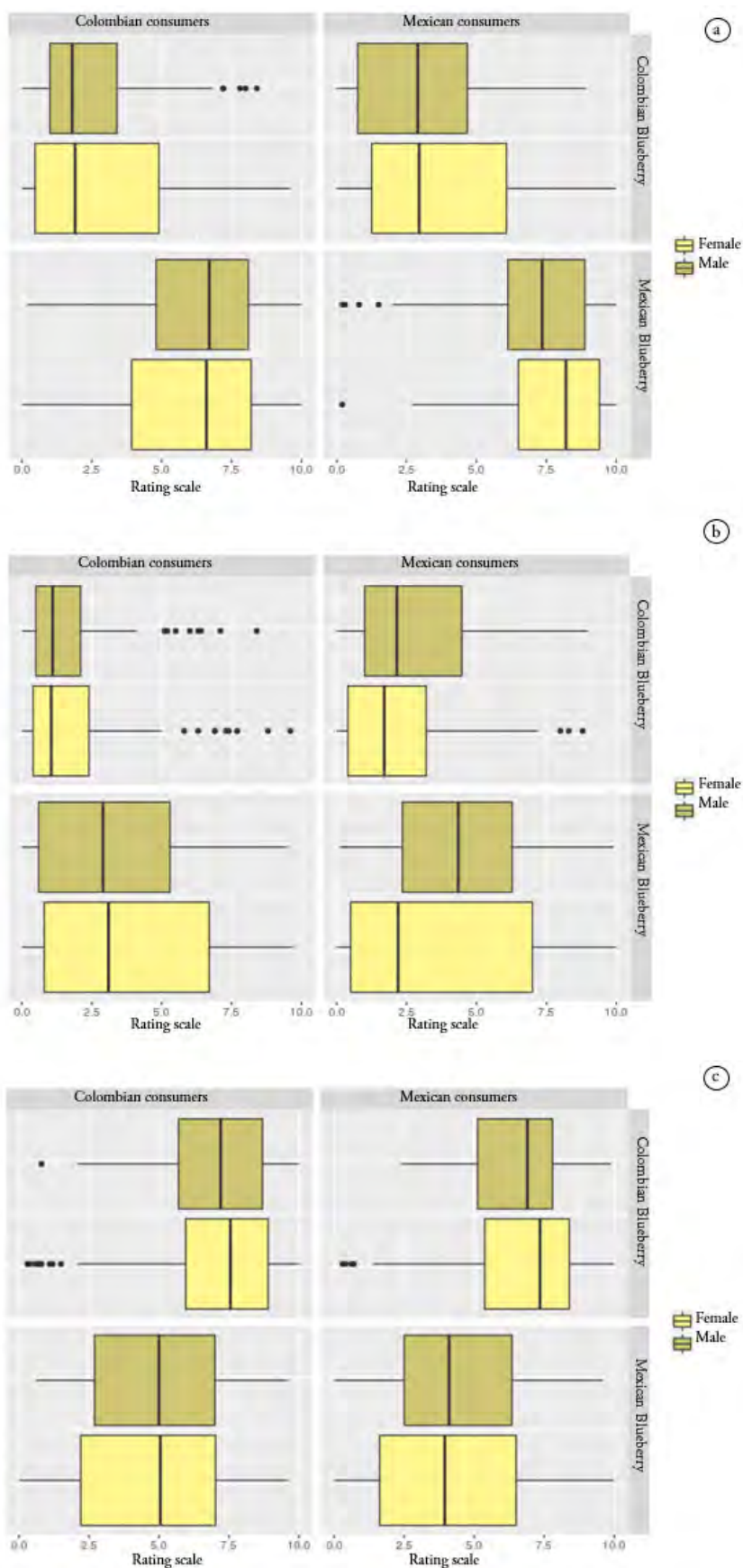


Figure 2. Rating of Colombian and Mexican blueberry by Colombian and Mexican consumers. a) acidity; b) tartness; c) sweetness.

According to this analysis (Table 2), the most valued attributes in Colombian blueberries are freshness and color intensity, while in the case of Mexican blueberries, participants recognize a higher intensity in aroma and acidity. The Colombian blueberry is the most liked. To assess any relationship between the ratings of the blueberries and the emotional valence of the facial emotional response, Pearson correlations with 2-tailed significance tests were performed. A significant positive correlation was observed between liking and acidity of the blueberries tasted ($r = -.399$, $p = .000$). This means that when the blueberry is rated as more acidic, the overall taste rating is lower (C. Similarly, a significant negative correlation was observed between freshness and negative valence (time percent) of the blueberries tasted ($r = -.189$, $p = .032$). This correlation suggests that when the blueberry was considered less fresh, the

participants showed negative emotional valence expressions for a greater percentage of the time. All other correlations were non-significant and irrelevant to our hypotheses.

In general, the emotional valences were more neutral (Table 3), that is, less positive and negative when testing the Colombian blueberry than the Mexican one (41.4% vs. 39.5%), which, as previously observed, coincides with the fact that it was precisely the Colombian blueberry that was the better evaluated, considered less acidic, and with more freshness. When analyzing specific emotions (Table 4), it is observed that only the expression of surprise is more persistent when evaluating the Colombian blueberry in relation to the Mexican (28.3% vs. 26.6%), the rest of the emotional expressions are more accentuated during the Mexican blueberry test.

Table 2. Crosstabulations: Blueberry variety and analyzed emotion by attribute.

Blueberry Variety / Emotion	Liking *	Freshness *	Color intensity *	Aroma intensity *	Acidity	Tartness *
Colombia	8.0	7.4	6.9	2.4	3.0	2.4
Mexico	6.7	6.9	5.9	2.7	5.6	3.4

Mean scores, marked with *, were significantly different according to Tukey's test (confidence level of 95%).

Table 3. Crosstabulations: Blueberry variety and perception of the stimulus

Blueberry variety / Emotion valence	Positive Time Percent *	Negative Time Percent *	Neutral Time Percent *
Colombia	8.0	6.8	41.4
Mexico	8.6	8.6	39.5

Mean scores, marked with *, were significantly different according to Tukey's test (confidence level of 95%).

Table 4. Crosstabulations: Blueberry variety and rating by type of emotion

Blueberry variety / Emotion	Joy Time Percent *	Anger Time Percent *	Surprise Time Percent *	Fear Time Percent *	Contempt Time Percent *	Disgust Time Percent *	Sadness Time Percent *
Colombia	18.4	15.5	28.3	16.3	15.1	15.1	20.2
Mexico	19.2	16.8	26.6	17.6	15.9	17.7	21.6

Mean scores, marked with *, were significantly different according to Tukey's test (confidence level of 95%).

The consumption of blueberries has been increasing in Mexico and Colombia due to their nutritional characteristics and the current situation. From this research, it can be concluded that consumers of this type of fruit can identify the attributes analyzed in the laboratory regarding flavor. It is also evident from the experiment that there are different characteristics of the fruit depending on the country of origin due to the soil, climate, and other factors of the cultivation of Biloxi variety blueberries (*Vaccinium corymbosum*) that were used in this study.

The tests showed statistically significant differences for acidity, tartness, and sweetness of the 14 attributes studied. This indicates that freshness, color, smell, firmness, juiciness, crunchiness, taste, grittiness, maturity, size, and gloss did not show statistically

significant differences. This would lead to the conclusion that the origin of the blueberry is not relevant in these attributes since the homogeneous characteristics are maintained.

At the level of preferences, it is observed that Mexicans consume this fruit more frequently compared to Colombians, however, in the qualification of the attributes, only an important difference is evidenced in their perception compared to size. Previous studies show how the aftertaste aroma of foods that are culturally familiar increases the preference for these foods (Gotow *et al.* 2021). In this sense, acidic flavors are more frequently found in Mexican cuisine, so such familiarity with aromas and flavors may have influenced the rating given to blueberries.

Based on the results of the study, the following recommendations can be made to blueberry producers:

Product adjustment according to local market: Given that significant differences were observed in the perception of sourness, sweetness, and sour taste between consumers in Mexico and Colombia, it would be advisable to adapt marketing strategies and products to local flavor preferences. For example, in Mexico, where acidic flavors are more appreciated, this characteristic of blueberries could be highlighted in advertising campaigns, or products that highlight the acidic flavor could be developed.

Focus on frequency of consumption: The results show that Mexicans consume blueberries more frequently than Colombians. Entrepreneurs in Colombia could focus on increasing the frequency of consumption through campaigns that highlight the nutritional benefits and versatility of blueberries in various local recipes, promoting their use in traditional Colombian dishes.

Homogeneity of certain attributes for international markets: Since attributes such as freshness, color, firmness and texture do not show significant differences depending on the country of origin, companies can focus on standardizing these attributes to ensure consistent quality internationally. This is especially important to maintain competitiveness in global markets, where the perception of quality is key.

Diversification of supply according to variety of blueberries: Although the Biloxi variety was used in this study, the possibility of introducing other blueberry varieties into the market that respond even better to local preferences in terms of flavor or texture could be explored, especially in Colombia where consumption is lower.

Acknowledgments. The authors thank the Asoberries and Asocolblue for providing us with the blueberries that were used in the development of the research. Additionally, the authors thank to Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales and Universidad Panamericana de México for the financial support for the research project. **Conflicts of interest:** The manuscript was prepared and revised with the participation of all authors, who declare that no conflict of interest would jeopardize the validity of the results presented. **Authors' contribution:** Jessica Rubiano-Moreno: conceptualization, development, and design of methodology, conducting the experiments and data collection, data analysis and application of statistical techniques, writing the manuscript. Violeta Corona: conceptualization, acquisition of financing, development, and design of methodology, data analysis and application of statistical techniques, review and editing of the manuscript. Alejandro Rodríguez-Magaña and Purificación García-Segovia: Data analysis and application of statistical techniques, review and editing the manuscript.

REFERENCES

ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS-
AOAC. 2000. Officials' methods of Analysis. Association of

Official Analytical Chemist. USA. Disponible desde internet en: <https://www.scirp.org/reference/ReferencesPapers?ReferenceID=1687699>

BAÑOS ARDAVÍN, E.J.; URRUTIA ALBISUA, E.; RODRÍGUEZ REGORDOSA, H.; OLMOS LÓPEZ, J.; DÍAZ VÁSQUEZ, A. 2014. Análisis sensorial. Primera Edición. Universidad popular autónoma del estado de puebla. 76p. Disponible desde Internet en: https://investigacion.upaep.mx/micrositios/assets/analisis-sensorial_final.pdf

BARRETT, L.F. 2017. How emotions are made: The secret life of the brain. Houghton Mifflin Harcourt. 425p.

CARDELLO, A.V.; MEISELMAN, H.L.; SCHUTZ, H.G.; CRAIG, C.; GIVEN, Z.; LESHER, L.L.; EICHER, S. 2012. Measuring emotional responses to foods and food names using questionnaires. *Food Quality and Preference*. 24(2):243-250. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2011.12.002>

CHENG, K.; PENG, B.; YUAN, F. 2020. Volatile composition of eight blueberry cultivars and their relationship with sensory attributes. *Flavour and Fragrance Journal*. 35(4):443-453. <https://doi.org/10.1002/ffj.3583>

CORTÉS-ROJAS, M.E.; MESA-TORRES, P.A.; GRIJALBA-RATIVA, C.M.; PÉREZ-TRUJILLO, M.M. 2016. Yield and fruit quality of the blueberry cultivars Biloxi and Sharpblue in Guasca, Colombia. *Agronomía Colombiana*. 34(1):33-41. <https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v34n1.54897>

EKMAN, P. 2003. Emotions revealed. Henry Holt and Company. New York. 320p.

EKMAN, P.; FRIESEN, W.V. 1971. Constants across cultures in the face and emotion. *Journal of Personality and Social Psychology*. 17(2):124-129. <https://psycnet.apa.org/doi/10.1037/h0030377>

FAYE, P.; COURCOUX, P.; GIBOREAU, A.; QANNARI, E.M. 2013. Assessing and taking into account the subjects' experience and knowledge in consumer studies. Application to the free sorting of wine glasses. *Food Quality and Preference*. 28(1):317-327. <https://doi.org/10.1016/J.FOODQUAL.2012.09.001>

GHEZZI, P.; STEIN, E.H.; INVEST, B.I.D. 2021. Los arándanos en el Perú. IADB: Inter-American Development Bank. United States of America. 32p. <http://dx.doi.org/10.18235/0003875>

GILBERT, J.L.; OLMSTEAD, J.W.; COLQUHOUN, T.A.; LEVIN, L.A.; CLARK, D.G.; MOSKOWITZ, H.R. 2014. Consumer-assisted selection of blueberry fruit quality traits. *HortScience*. 49(7):864-873. <https://doi.org/10.21273/hortsci.49.7.864>

- GOTOW, N.; SKRANDIES, W.; KOBAYASHI, T.; KOBAYAKAWA, T. 2021. Traditional Japanese confection overseas: Cultural difference and retronasal aroma affect flavor preference and umami perception. *Food Quality and Preference*. 92:104204. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2021.104204>
- GREIS, M.; NOLDEN, A.A.; KINCHLA, A.; PUPUTTI, S.; SEPPA, L.; SANDELL, M. 2021. What if plant-based yogurts were like dairy yogurts? Texture perception and liking of plant-based yogurts among US and Finnish consumers. *Food Quality and Preference*. 87:104030. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2023.104848>
- HERNÁNDEZ SAMPIERI, R.; FERNÁNDEZ COLLADO, C.; BAPTISTA LUCIO, P. 1991. *Metodología de la Investigación*. McGraw Hill. 497p.
- HOKE, O.; CAMPBELL, B.; BRAND, M.; HAU, T. 2017. Impact of information on Northeastern U.S. consumer willingness to pay for aronia berries. *HortScience*. 52(3):395-400. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI11376-16>
- IMOTIONS. 2021. iMotions Facial Expression Analysis. Disponible desde Internet en: <https://imotions.com/biosensor/fea-facial-expression-analysis/>
- JONAUSKAITE, D.; ABU-AKEL, A.; DAEL, N.; OBERFELD, D.; ABDEL-KHALEK, A.M.; AL-RASHEED, A.S.; ANTONIETTI, J.-P.; BOGUSHEVSKAYA, V.; CHAMSEDDINE, A.; CHKONIA, E.; RONA, V.; FONSECA-PEDRERO, E.; GRIBER, Y.; GRIMSHAW, G.; HASSAN, A.A.; HAVELKA, J.; HIRNSTEIN, M.; KARLSSON, B.S.A.; LAURENT, E.; LINDEMAN, M.; MARQUARDT, L.; MEFOH, P.; PAPADATOU-PASTOU, M.; PÉREZ-ALBÉNIZ, A.; POUYAN, N.; ROINISHVILI, M.; ROMANYUK, L.; SALGADO MONTEJO, A.; SCHRAG, Y.; SULTANOVA, A.; UUSKÜLA, M.; VAINIO, S.; WĄSOWICZ, G.; ZDRAVKOVIĆ, S.; ZHANG, M.; MOHR, C. 2020. Universal patterns in color-emotion associations are further shaped by linguistic and geographic proximity. *Psychological Science*. 31(10):1245-1260. <https://doi.org/10.1177/0956797620948810>
- KANEDA, H.; MAESHIMA, K.; GOTO, N.; KOBAYAKAWA, T.; AYABE-KANAMURA, S.; SAITO, S. 2000. Decline in taste and odor discrimination abilities with age, and relationship between gustation and olfaction. *Chemical Senses*. 25(3):331-337. <https://doi.org/10.1093/chemse/25.3.331>
- KONARSKA, A. 2015. Development of fruit quality traits and comparison of the fruit structure of two *Vaccinium corymbosum* (L.) cultivars. *Scientia Horticulturae*. 194(14):79-90. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.08.007>
- LAGUNES-FORTIZ, E.R.; LAGUNEZ FORTIZ, E.; GÓMEZ-GÓMEZ, A.A.; LEOS-RODRÍGUEZ, J.A.; OMAÑA-SILVESTRE, J.M. 2020. Competitividad y rentabilidad de la producción de frutillas en Jalisco. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 11(8):1815-1826. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i8.2595>
- MONTERO, I.; LEÓN, O.G. 2002. Clasificación y descripción de las metodologías de investigación en Psicología. *International Journal of Clinical and Health Psychology*. 2(3):503-508.
- MOTOKI, K.; PATHAK, A.; SPENCE, C. 2022. Tasting prosody: Crossmodal correspondences between voice quality and basic tastes. *Food Quality and Preference*. 100:104621. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2022.104621>
- MULÍK, S.; OZUNA, C. 2020. Mexican edible flowers: Cultural background, traditional culinary uses, and potential health benefits. *International Journal of Gastronomy and Food Science*. 21:100235. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2020.100235>
- NEUROMARKETING SCIENCE AND BUSINESS ASSOCIATION- NMSBA. 2022. NMSBA Code of Ethics - NMSBA. Disponible desde Internet en: <https://www.nmsba.com/neuromarketing-companies/code-of-ethics>
- PIQUERAS-FISZMAN, B.; LAUGHLIN, Z.; MIODOWNIK, M.; SPENCE, C. 2012. Tasting spoons: Assessing how the material of a spoon affects the taste of the food. *Food Quality and Preference*. 24(1):24-29. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2011.08.005>
- REINOSO CARVALHO, F.; VAN EE, R.; RYCHTARIKOVA, M.; TOUHAFI, A.; STEENHAUT, K.; PERSOONE, D.; SPENCE, C. 2015. Using sound-taste correspondences to enhance the subjective value of tasting experiences. *Frontiers Psychology*. 6:1309. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.01309>
- RIVERA, S.; GIONGO, L. CAPPAL, F.; KERCKHOFFS, H.; SOFKOVA-BOBCHEVA, S.; HUTCHINS, D.; EAST, A. 2022. Blueberry firmness - A review of the textural and mechanical properties used in quality evaluations. *Postharvest Biology and Technology*. 192:112016. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2022.112016>
- ROMO-MUÑOZ, R.; DOTE-PARDO, J.; GARRIDO-HENRÍQUEZ, H.; ARANEDA-FLORES, J.; GIL, J. M. 2019. Blueberry consumption and healthy lifestyles in an emerging market. *Spanish Journal of Agricultural Research*. 17(4):e0111. <https://doi.org/10.5424/sjar/2019174-14195>

- SPENCE, C. 2017. *Gastrophysics: The new science of eating*. Viking. 336p.
- STONE, H.; BLEIBAUM, R.; THOMAS, H. 2012. *Sensory evaluation practices*. Academic press. 446p.
- TINOCO-PLASENCIA, C.J.; ZAMBRANO-CASIMIRO, L.M.; ROQUE-PAREDES, O.; CHÁVEZ-MAYTA, R.W.; MAGUIÑA-VÁSQUEZ, B.M.; ESPEJO CALDERÓN, J.W. 2023. Los arándanos, generalidades y desarrollo en el mercado mundial: una revisión de literatura. *Paideia XXI*. 13(1):125-140. <https://doi.org/10.31381/paideia.v13i1.5674>
- VELASCO, C.; JONES, R.; KING, S.; SPENCE, C. 2013. The sound of temperature: What information do pouring sounds convey concerning the temperature of a beverage. *Journal of Sensory Studies*. 28(5):335-345. <https://doi.org/10.1111/joss.12052>
- VELASCO, C.; WOODS, A.T.; HYNDMAN, S.; SPENCE, C. 2015. The taste of typeface. *i-Perception*. 6(4):204166951559304. <https://doi.org/10.1177/2041669515593040>
- WANG, Q.J.; WOODS, A.T.; SPENCE, C. 2015. "What's your taste in music?" a comparison of the effectiveness of various soundscapes in evoking specific tastes. *i-Perception*. 6(6):1-23. <https://doi.org/10.1177/2041669515622001>
- YUE, C.; WANG, J. 2017. Consumer preferences for fresh blueberry attributes. *Acta Horticulturae*. 1180:1-7. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2017.1180.1>



Development of functional panela cheese enriched with prebiotics and probiotics

Desarrollo de queso panela funcional enriquecido con prebióticos y probióticos

Karina Tiscareño-Ortega¹ ; Norma Angélica Chávez-Vela^{2*} ; Julieta Domínguez-Soberanes³ ;
Gabriela Mariana Rodríguez-Serrano⁴

¹Universidad Panamericana. Escuela de Dirección de Negocios Alimentarios. Aguascalientes - México; e-mail: 0241321@up.edu.mx.

²Universidad Autónoma de Aguascalientes, Departamento de Ingeniería Bioquímica. Aguascalientes - México; e-mail: angelica.chavez@edu.uaa.mx

³Universidad Panamericana. Facultad de Ingeniería. Aguascalientes - México; e-mail: jdominguez@up.edu.mx

⁴Universidad Autónoma Metropolitana, Iztapalapa, Departamento de Biotecnología, Ciudad de México - México; e-mail: gmrs@xanum.uam.mx

*corresponding author: angelica.chavez@edu.uaa.mx

How to cite: Tiscareño-Ortega, K.; Chávez-Vela, N.A.; Domínguez-Soberanes, J.; Rodríguez-Serrano, G.M. 2024. Development of functional panela cheese enriched with prebiotics and probiotics. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 27(2):e2656. <http://doi.org/10.31910/rudca.v27.n2.2024.2656>

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 9, 2024

Accepted: November 27, 2024

Edited by: Helber Adrián Arévalo Maldonado

ABSTRACT

Food trends show interest in functional foods, which provide health and nutrition. This research is focused on developing a functional Mexican-style panela cheese that incorporates the probiotics *Bifidobacterium animalis* subsp. *lactis*, *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* NCFB 2772, *Lactocaseibacillus rhamnosus* GG and 4% inulin as a prebiotic. Yield, and content of lactic acid bacteria (LAB) and CFU of total coliforms were evaluated. Scanning Electron Microscopy was performed to evaluate the incorporation of the bacteria in the matrix. Furthermore, shelf life was established. The cheese yielded 26.6% (w/v), and its microbial content reached 7.12×10^8 CFU/g, exceeding the Mexican Norm NOM 181. Inulin enhanced probiotic growth, and electron microscopy confirmed the successful integration of bacteria within the cheese matrix. Shelf-life studies demonstrated sustained LAB growth above 10^8 CFU/g for 22 days, though the shelf life was determined to be 13 days under refrigeration at 4 °C due to coliform bacteria detection. Sensory evaluation revealed through just about right within the 60% range where dairy flavor, mouthfeel moisture, creaminess, and adhesiveness; showing that no reformulation should take place. Furthermore, CATA analysis showed that attributes that better described the product were dairy flavor, mouth moisture, fresh milk smell, white color, and smooth texture. The cheese scored 5.03 ± 1.23 on a 7-point acceptance scale and achieved a 69% purchase intention rate. Therefore, a functional cheese product was obtained with LAB and inulin with adequate sensory characteristics.

Keywords: *Bifidobacterium*; Dairy product; Functional fermented product; Inulin; *Lactobacillus*.

RESUMEN

Las tendencias alimentarias muestran un creciente interés por alimentos funcionales que ofrecen beneficios para la salud y nutrición. Esta investigación desarrolló un queso panela funcional de estilo mexicano que incorpora los probióticos *Bifidobacterium animalis* subsp. *lactis*, *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* NCFB 2772, *Lactocaseibacillus rhamnosus* GG y un 4% de inulina como prebiótico. Se evaluó el rendimiento, y el contenido de bacterias ácido lácticas (BAL) y UFC de coliformes totales. La microscopía electrónica de barrido confirmó la incorporación de bacterias en la matriz del queso. El rendimiento fue del 26,6 % (p/v), y el contenido microbiano alcanzó $7,12 \times 10^8$ UFC/g, superando el requisito de la Norma Mexicana NOM 181. La inulina promovió el crecimiento probiótico, logrando BAL superiores a 10^8 UFC/g durante 22 días. Sin embargo, la vida útil del queso se estableció en 13 días bajo refrigeración a 4 °C, debido a la detección de bacterias coliformes. La evaluación sensorial con la escala just about right mostró valores dentro del rango del 60 % para sabor lácteo, humedad en boca, cremosidad y adhesividad, indicando que no se requiere reformulación. El análisis CATA destacó atributos como sabor lácteo, humedad en boca, olor a leche fresca, color blanco y textura suave. El queso obtuvo una puntuación de aceptación de $5,03 \pm 1,23$ en una escala de 7 puntos y una intención de compra del 69 %, demostrando su funcionalidad y adecuadas características sensoriales. Por lo tanto, se obtuvo un producto de queso funcional con BAL e inulina con características sensoriales adecuadas.

Palabras clave: *Bifidobacterium*; Inulina; *Lactobacillus*; Producto funcional fermentado; Producto lácteo.

INTRODUCTION

Food market trends for 2030 aim to introduce functional foods, low-fat foods with greater health benefits, and better nutritional profiles. Cheese is one of the best options among the various food matrices for incorporating probiotics due to its status as one of the most widely consumed dairy products globally, attributed to its nutritional contribution, sensory appeal, and potential inherent health benefits (Hammam & Ahmed, 2019; Machado *et al.* 2023).

Probiotics are defined as selected and viable microbial dietary supplements that, when introduced in sufficient quantities, beneficially affect the human organism through their effects on the intestinal tract. These beneficially affect the human body through their effects on the intestinal tract when introduced in sufficient quantities. Probiotic-rich foods constitute 60 to 70% of the total functional foods market (Fuentes-Berrio *et al.* 2015). These bacteria are crucial in repairing intestinal microbiota and restoring their functions. They primarily benefit human health through three general mechanisms of action: exclusion or inhibition of pathogens, improvement of the epithelial barrier function, and modulation of host immune responses (Pandey *et al.* 2015). The mechanism of action of probiotics includes the normalization of disturbed microbiota, regulation of intestinal transit, increased renewal of enterocytes, reinforcement of the intestinal barrier, resistance to colonization, production of acids and short-chain fatty acids, synthesis of vitamins, and metabolism of bile salts. The main sources of probiotics are kefir, yogurt, and some pickles (Pandey *et al.* 2015).

The main bacterial groups among probiotics are *Bifidobacterium* and *Lactobacillus*, which contribute to the immune system's development and are considered beneficial for enhancing overall health (Thompson *et al.* 2022; Ağagündüz *et al.* 2023). Recent attention to probiotics, termed immunobiotics by Villena *et al.* (2016), emphasizes their beneficial interactions and immune system regulations at mucosal levels.

Some of the most used probiotic strains in dairy food products are *Bifidobacterium animalis* subsp. *lactis*, BB-12[®] that promotes gastrointestinal health and improves immunity, and furthermore, they are widely used because they don't affect the taste, appearance, or mouthfeel of products (Jungersen *et al.* 2014), *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* NCFB 2772, which produces extracellular polysaccharides (EPS), enhancing viscosity, preventing syneresis, and improving sensory characteristics in fermented dairy products. Furthermore, it regulates immune response (Stachelska & Foligini, 2018; Bancalari *et al.* 2022), and *Lactocaseibacillus rhamnosus* (formerly *Lactobacillus rhamnosus* GG), which is a potential probiotic with resistance to acid and bile, inhibits harmful bacteria, acting as a natural preservative in yogurt-type products, secretes inhibitory substances against various bacterial species and significantly, balances the intestinal micro ecological system, providing immunomodulation. Studies show that these bacteria promote immune response and exhibit substantial antioxidant activity under physical stress, which benefits athletes (Rani & Yadav, 2018). With probiotics, the microbiota can be recolonized

with beneficial bacteria, however, with prebiotics, the growth of these bacteria is stimulated.

Prebiotics are substrates selectively used by organisms to provide health benefits (Gibson *et al.* 2017). Some examples of these are fructooligosaccharides, inulin, pectins, mycelium or resistant starch. They influence lipid and mineral metabolism and cause changes in the intestine. Prebiotics are functional only in the colon, where beneficial microbiota like *Bifidobacteria* spp. and *Lactobacillus* spp. consume them. They provide energy for large intestine bacteria, fermenting into short-chain fatty acids (Rawi *et al.* 2020; Thompson *et al.* 2022). Non-digestible oligosaccharides, such as inulin-based fructo-oligosaccharides and galacto-oligosaccharides, are found in foods like garlic, Jerusalem artichokes, jicama, dandelion greens, and onions (Thompson *et al.* 2022). These prebiotics can alter intestinal microbiota, reduce harmful bacteria, and increase beneficial bifidobacteria (Fuentes-Berrio *et al.* 2015). Benefits include aiding mineral absorption, improving immune function, lowering blood cholesterol, potentially preventing cancer, and relieving constipation and irritable bowel syndrome. They also enhance the immune system, control appetite and weight, promote regularity, and increase bone density (Shoaib *et al.* 2016).

Inulin, a water-soluble, non-digestible fructan is recognized for health benefits and is generally considered safe in the US. It is abundant in chicory roots and has reduced caloric value, dietary fiber benefits, and prebiotic effects. It is used in dairy and non-dairy products as a fat replacement and texture enhancer (Karimi *et al.* 2015). Inulin promotes intestinal barrier repair, detoxifies carcinogens, supports beneficial microbes, and increases butyrate production (Hutchinson *et al.* 2023). It lowers blood glucose, improves liver and kidney functions, and helps counteract hyperglycemia and hypercholesterolemia as a low-calorie, plant-based fat supplement (Tresina *et al.* 2022). The addition of inulin to different types of cheese can be beneficial in the manufacture of a reduced or low-fat textured symbiotic product.

The objective of this research is to develop a functional Mexican-style cheese that is a healthy choice for consumers, presenting a high-protein and low-fat product. This product should be functional, which means that prebiotics and/or probiotics should be included. Moreover, it should have adequate sensory characteristics.

MATERIALS AND METHODS

Standardization of the Panela Cheese Production Procedure.

The production process of panela cheese is typically low in fat (González-Córdova *et al.* 2016). Raw milk from the private company Lácteos del Camino, located in Aguascalientes, México, was used. The 4 L milk was skimmed using an 80-100 L Electric Milk Cream Separator from Motor Sich (Ukraine) and pasteurized at 74°C for 1 minute. Milk with 0.02% fat was obtained, according to the technical sheet of the equipment. To make the cheese, rennet (Cuarmix, Chr Hansen México S.A. de C.V., Mexico) was added according to the manufacturer's instructions, and calcium chloride (MABI, Mexico) was added at 0.02%. The milk was

allowed to coagulate for 1 h. After the milk starts to coagulate, the probiotic culture is added, like the procedure performed by other researchers (Escobar *et al.* 2012). The solids were recovered, and the characteristic shape of panela cheese, resembling a basket, was given.

Preparation of bacterial Inoculants. Assays were conducted with three lactic acid-producing microbial strains: 1) *Bifidobacterium animalis subsp. lactis*, BB-12[®] (BB-12), 2) *Lactobacillus delbrueckii subsp. bulgaricus* NCBF 2772 (Lb. 2772), and 3) *Lacticaseibacillus rhamnosus* GG (Lb. GG).

Each strain was reactivated using 1 mL of it from previously inactivated cultures in glycerol. The strains were reactivated in 50 mL of a Man, Rogosa, and Sharp medium (MRS, Becton, Dickinson

& Company, France) at 37 °C to obtain young and active cultures. Inoculants from the above bacterial cultures were prepared in milk for panela cheese preparation. From each reactivated culture, 1 ml was taken and added to the pasteurized milk and then incubated for 6 h at 37°C

Cheeses. Three cheeses were produced with the following formulations to find the optimal combination. 1. Control without any microorganism, 2. *Bifidobacterium animalis subsp. lactis* BB-12[®] at 5% and *Lactobacillus delbrueckii subsp. bulgaricus* NCBF 2772 at 5% was added for achieving a final probiotic concentration of 10%, and 3. *Bifidobacterium animalis subsp. lactis* BB-12[®] at 3.33%, *Lactobacillus delbrueckii subsp. bulgaricus* NCBF 2772 at 3.33% and *Lacticaseibacillus rhamnosus* GG at 3.33% were added for a final probiotic concentration of 10% (Figure 1).

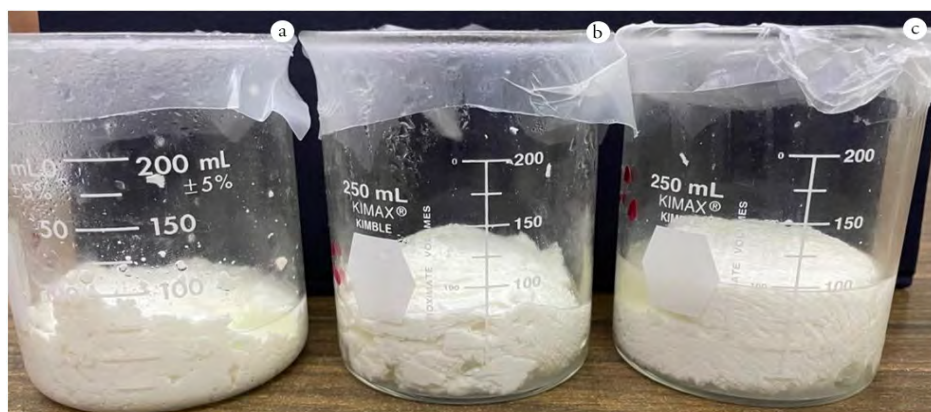


Figure 1. Appearance of cheeses obtained with different strains of lactic acid bacteria: a) cheese without lactic acid bacteria (prototype); b) Cheese supplemented with *Bifidobacterium animalis subsp. lactis* and *Lactobacillus delbrueckii subsp. bulgaricus* 2772; c) Cheese supplemented with *Bifidobacterium animalis subsp. lactis*, *Lactobacillus delbrueckii subsp. bulgaricus* 2772, and *Lacticaseibacillus rhamnosus* GG. The cheeses were incubated at 37°C for 1 hour and then refrigerated at 4°C.

Yield, microbial count, and sensory characteristics of cheeses were evaluated. Yield was measured by dividing the final weight of recovered solids by the initial milk weight. Furthermore, colony-forming unit (CFU) counts of lactic acid bacteria were performed on Man, Rogosa and Sharpe (MRS) agar plates. Additionally, coliform enumeration was evaluated by Violet Red Lactose Agar (VRLA) by seeding a sample from each cheese, and counts were obtained through serial dilutions.

Identification by electron microscopy of the presence of lactic acid bacterial cultures and inulin in functional cheese. Samples were dehydrated with alcohol 60 to 100%. Extent moisture was removed by liquid CO₂ in a critical point dryer (TOUSIMIS). Samples were then counted with gold using a DESK II chamber and photographed with a JEOL LV 5900 SEM). This was performed at the Universidad Autónoma de Aguascalientes, México using the protocol defined by that laboratory.

Determination of the shelf life of functional cheese. Viable counts of LAB were estimated after 1, 7, 15, 21, and 30 days of storage at 4 °C. Serial dilutions were made and seeded on MRS (Becton, Dickinson & Company, France) medium agar, which allows the development of lactic acid bacteria and VRLA, which is

a selective medium for the detection and enumeration of coliform microorganisms (both manufactured and distributed by Becton Dickinson in Mexico). Incubation was carried out for 48 h at 37°C. Afterward, CFUs/g were counted. When coliforms in the VRLA agar plates were observed, the shelf life was determined. In addition, the LAB was monitored to comply with Mexican NOM 181, which must have a range between 10⁶ CFU/g and 10⁸ CFU/g to be considered a functional product.

Sensory evaluation of functional cheese. One hundred sensory questionnaires were administered to consumers aged 18-70 in Aguascalientes, Mexico. All participants agreed to participate in the sensory analysis of this research and signed the informed consent form. This work is part of a project approved by Universidad Panamericana by the Ethics Committee 2002-2024.

A sensory questionnaire was generated with six sections. Information on gender, age, and product consumption was collected, asking consumers if the product was just right or needed more or less of a specific attribute. The just-about-right (JAR) test evaluated the following attributes (lactic flavor, acidic flavor, moisture in mouth, creaminess, gumminess, adhesiveness, and aftertaste).

The Check All That Apply (CATA) method assessed 20 cheese-related attributes (Hernández-Cervantes *et al.* 2010; CEA, 2018). A 7-point hedonic scale was used to evaluate the acceptability of the product. Finally, consumers were asked if they would buy this product.

RESULTS AND DISCUSSION

Selection of bacterial cultures for making functional cheese.

The cheese with the highest CFU count for lactic acid bacteria was panela cheese supplemented with *Bifidobacterium animalis* subsp. *lactis*, *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* NCFB 2772, and *Lactocaseibacillus rhamnosus* GG (Table 1) reached a 7.12×10^8 CFU, and the cheese yield relative to the volume of milk reached 26.66%.

This response can be attributed to a synergistic effect between the probiotic bacteria (Pranckutė *et al.* 2016), and the increased water retention generated by the presence of exopolysaccharides. Using EPS-producing bacteria increases moisture content, resulting in improved sensory attributes for low-fat products due to the water-absorbing capacity of EPS, increasing product viscosity. Certain lactobacilli can produce exopolysaccharides (EPS), used in the food industry to enhance the texture of products such as yogurt, cheese, and other dairy products. Additionally, EPS has health benefits, including immune system stimulation, anti-mutagenic properties, and anti-tumor activity (Harutoshi, 2013). In this case, it is an EPS producer (Fox *et al.* 2017) notably, EPS also possesses prebiotic abilities since their composition allows for slower metabolism by the intestinal microbiota, reaching parts of the distal colon (Harutoshi, 2013). Therefore, *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* NCFB

2772 was selected, aiding in cheese yield, contributing to the prebiotic effect (in addition to inulin), and achieving the desired symbiotic effect.

Ideally, probiotic strains for food applications should originate from humans, be acid and bile-tolerant, adhere to the gastrointestinal tract linings, compete with pathogenic bacteria, and have a safe dosage for human consumption. Selection criteria for probiotics include benefiting the host, surviving transit through the intestines, adhering to the intestinal epithelial cell membrane, creating antibiotic substances against infections, and stabilizing the intestinal microflora (Tegegne & Kebede, 2022). The chosen cultures BB12, Lb. 2772, and Lb. GG have been successfully used in dairy matrices before (Castro *et al.* 2015). These microorganisms, especially lactobacilli and bifidobacteria are associated with health benefits such as immune system activation, inhibition of pathogenic bacteria, and vitamin production (Hugenholtz & Smid, 2002).

After selecting the appropriate probiotic combination, the influence of inulin on bacterial growth was evaluated. A growth of 1.27×10^8 UFC/g was observed, compared to 4.53×10^7 UFC/g without inulin, indicating 2.8 times more growth. Logarithmically the increase in microbial growth aligns with the literature, which states that inulin favors the growth of lactic acid bacteria by being selectively metabolized (Table 2). In cheese, inulin can reduce fat by 63% with 3.4% added inulin, but more than 8% affects sensory appeal (Talbot-Walsh *et al.* 2018). Additionally, the effect of inulin is not limited to cheese; it also promotes the growth of bifidobacteria in the intestine, known as the bifidogenic effect of prebiotic compounds (Hughes *et al.* 2022).

Table 1. Comparison of attributes of panela cheese with lactobacilli strain combinations

Cheese	CFU/g	Volume	Yield (w/v)
Control Panela Cheese	5.26×10^4	50 mL	15%
Panela Cheese with <i>Bifidobacterium animalis</i> subsp. <i>lactis</i> and <i>Lactobacillus delbrueckii</i> subsp. <i>bulgaricus</i> 2772	9.66×10^6	75 mL	20.67%
Cheese supplemented with <i>Bifidobacterium animalis</i> subsp. <i>lactis</i> , <i>Lactobacillus delbrueckii</i> subsp. <i>bulgaricus</i> 2772, and <i>Lactocaseibacillus rhamnosus</i> GG	7.12×10^8	100 mL	26.33%

Table 2. Influence of the presence of inulin on probiotic UFC count in panela cheese

Cheese	UFC/g
Control Panela Cheese	9.38×10^4
Panela Cheese with <i>Bifidobacterium animalis</i> subsp. <i>lactis</i> and <i>Lactobacillus delbrueckii</i> subsp. <i>bulgaricus</i> 2772	4.53×10^7
Cheese supplemented with <i>Bifidobacterium animalis</i> subsp. <i>lactis</i> , <i>Lactobacillus delbrueckii</i> subsp. <i>bulgaricus</i> 2772, and <i>Lactocaseibacillus rhamnosus</i> GG	1.27×10^8

Identification by electron microscopy of the presence of lactic bacterial cultures and inulin in functional cheese. Images were taken through electron microscopy to confirm lactobacilli's presence in the protein matrix. In Figure 2, the presence of lactobacilli and bifidobacteria can be observed. Electron microscope photographs clearly show the presence of bifidobacteria and lactobacilli, notably,

the cultures remain viable where a lactobacillus is dividing showing the possible interaction of bacteria with inulin and demonstrating the proliferation of lactobacilli within the protein and inulin matrix, according to the literature, demonstrating that lactobacilli can continue to grow within their environment as long as they have the means to survive and reproduce (Rolim *et al.* 2020).

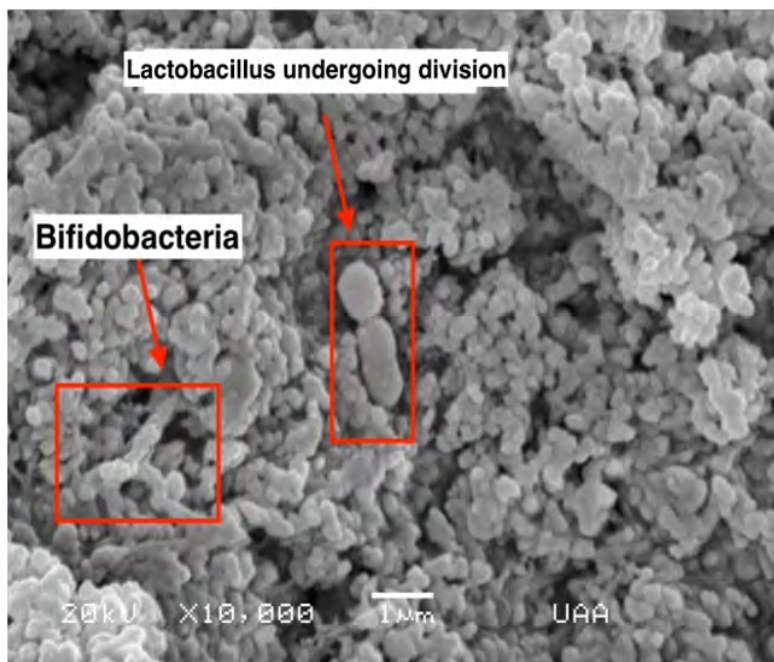


Figure 2. Electron microscope micrograph of *Bifidobacterium* and *Lactobacillus*, the latter can be observed in the process of dividing.

Shelf life of cheese. The shelf life of a food product, also known as its useful life, is the period counted from its production date, during which it maintains acceptable sensory and safety characteristics for consumers. The following steps were taken: Over 22 days, microbial growth was monitored in a standard counting medium, on bile red violet agar to determine coliforms, and on MRS agar to quantify the presence of lactobacilli. Microbial growth above 10^8 CFU/g was observed over 22 days, Figure 3a, although it began to decline after 13 days. Additionally, figure 3b shows the growth of other bacteria not related to lactobacilli, which increased after 20 days of shelf life.

The product's shelf life ends at 13 days when pathogenic microorganisms are observed. This is a challenge due to the water activity available in the product, as higher water activity leads to increased bacterial development (Wemmenhove *et al.* 2021). The microbial count remained above 10^6 UFC/g, although a decrease was observed after day 13. To achieve the attributed effects of probiotics, microbial counts should be above 10^6 UFC/g, although it is noteworthy that sensorial flavors characteristic of analog cheese without probiotics are expected to be maintained (Karimi *et al.* 2012).

Sensory evaluation of functional cheese. In the just-about-right (JAR) analysis, the laboratory-made cheese showed that the acidic flavor, creaminess, and adhesiveness presented over 60% of Just About Right (JAR=3). Additionally, it was found that the

moisture in mouth (JAR=3) was 29%, which means that more is needed because 69% of the consumers (JAR $\leq$ 3) thought that this parameter was too low; similar results were found in aftertaste. When evaluating sensory characteristics, the prototype cheese was compared with three commercial cheeses. In Figure 4, the just about right (JAR) prototype was analyzed taking into consideration critical attributes for this type of cheese.

The technique uses a scale where the center is just right (JAR =3), in our study's case, referring to the number 3. Below this number, it is considered that the product has a low amount of the evaluated attribute. Conversely, if the evaluation is higher than 3, it denotes that the attribute is present in a higher proportion than necessary. In this way, the ideal product should have all attributes evaluated as "just right". In the food industry, achieving all attributes as just right only sometimes happens, so this test can help establish new formulations by changing certain ingredients or processes. However, when evaluating these methodologies Popper (2014) indicated that if 75% of consumers evaluated that all products within a formulation could be JAR, the decision could be made to accept it as a prototype. However, this parameter could change depending on the type of food being analyzed. In particular, a product is considered suitable for low-fat products when obtaining 60% off "just right" in the evaluated attributes. Taking into consideration the abovementioned information, acidic flavor, creaminess, and adhesiveness were over 60% of JAR.

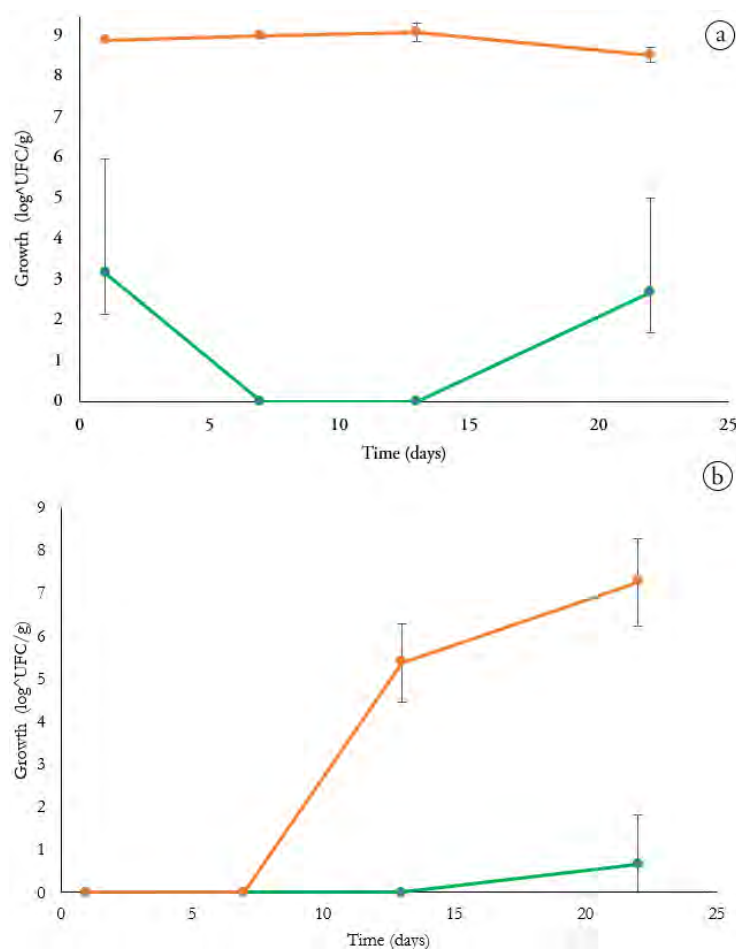


Figure 3. a) Growth of lactobacilli in functional panela cheese. In orange, panela cheese with *Bifidobacterium animalis* subsp. *lactis*, *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* 2772, *Lacticaseibacillus rhamnosus* GG and inulin 4%. In green, control group. b) Growth of bacteria other than lactobacilli in functional panela cheese. In orange, panela cheese with *Bifidobacterium animalis* subsp. *lactis*, *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* 2772, *Lacticaseibacillus rhamnosus* GG and Inulin 4%. In green control group.

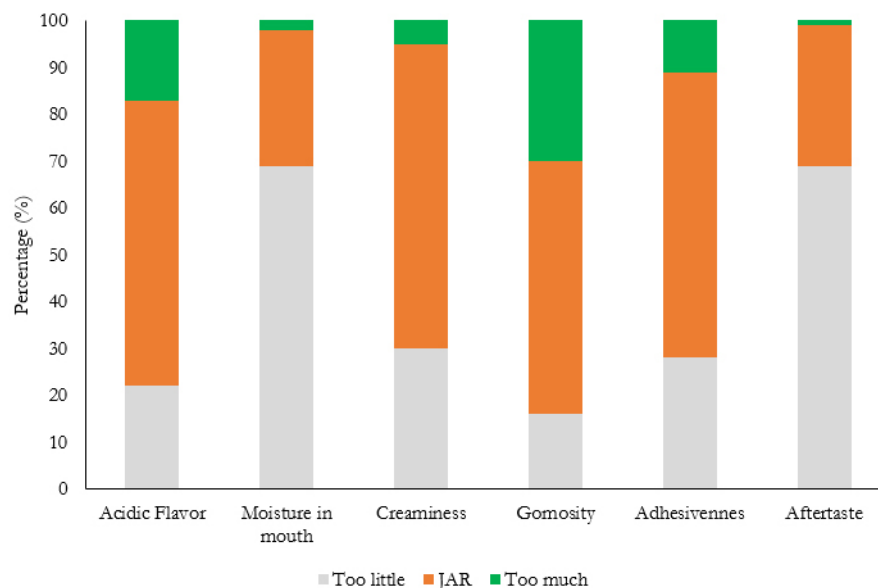


Figure 4. Just-about-right JAR of the prototype developed in the laboratory

The attributes that could be considered in the case of making a new formulation are moisture in the mouth and aftertaste, where JAR is around 30%. This could be because the flavor development had yet to occur at the testing point, as the lactic acid bacteria would be expected to acidify the product over time. The creaminess found was like the percentage defined by other researchers as Jiménez-Guzmán *et al.* (2009) who produced panela cheese with EPS, in that case, with *Streptococcus thermophilus*.

A sensory technique called CATA (check all that apply) was applied, where consumers were asked to mark all attributes detected in the prototype panela cheese. The results reveal that the prototype of panela cheese with lactic acid bacteria can be described as a product with a dairy flavor (87%), a fresh milk smell (85%), white color (84%), smooth texture (86%), and when tasted, it generates moisture in the mouth (82%).

The Check-All-That-Apply (CATA) analysis revealed that the prototype cheese had dairy flavor (87%), smelled of fresh milk (85%), was white (84%), had a soft texture (86%), and generated mouth moisture upon tasting (82%). The results are consistent with expectations, as its white color and dairy flavor characterize panela cheese (IDFA, 2023). Similarly, the soft texture and mouth moisture can be attributed to the presence of EPS. The EPS produced by *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* NCFB 2772 aids water retention, creating a sensation of moisture and perceived smoothness, preventing syneresis and granularity, and providing the product with a natural thickness (Oberg *et al.* 2022).

On the other hand, the acceptance level of the generated prototype was 5.03 ± 1.23 , indicating a slight liking, but that was in the range of the other commercial brands analyzed. Moreover, the purchase intention would be 69%.

In conclusion, it can be established that a functional panela cheese was developed. This product incorporated three probiotic strains: *Bifidobacterium animalis* subsp. *lactis* BB-12[®] (3.33%), *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* NCBF 2772 (3.33%), and *Lactocaseibacillus rhamnosus* GG (3.33%) for a final probiotic concentration of 10%. In addition, the prototype included a probiotic Orafiti[®] inulin (4%).

The presence of inulin demonstrated a prebiotic effect, promoting the LAB growth, which reached a high microbial count exceeding 8×10^8 CFU/g; surpassing the minimum requirement of 10^6 CFU/g according to Mexican norm NOM 181, which establishes that the range should be between 10^6 and 10^8 CFU/g to consider it a functional product. The interaction of LAB within the food matrix was confirmed through SEM.

The resulting functional product contained BAL and inulin (prebiotic); therefore, it is possible to consider it functional, demonstrating excellent microbial and structural properties and offering desirable sensory characteristics such as creaminess and mouth moisture.

Ethical considerations: Chat GPT was used to translate from Spanish to English. Grammarly was employed to check the document's style. After using these tools/services, the authors reviewed and edited the content as needed. **Conflicts of interest:** The manuscript was prepared and revised with the participation of all authors, who declare that no conflict of interest would jeopardize the validity of the results presented. **Authors' contribution:** Karina Tiscareño-Ortega: Validation, formal analysis, investigation, original draft preparation, and review and editing; Norma Angélica Chávez-Vela and Julieta Domínguez-Soberanes: Conceptualization, methodology, validation, formal analysis, investigation, resources, original draft preparation, review and editing, visualization, supervision, project administration, and funding acquisition; Gabriela Mariana Rodríguez-Serrano: Conceptualization, methodology, validation, formal analysis, investigation, resources, original draft preparation and review and editing.

REFERENCES

- AĞAGÜNDÜZ, D.; COCOZZA, E.; CEMALI, Ö.; BAYAZIT, A. D.; NANİ, M. F.; CERQUA, I.; SAYGILI, S. K.; CANANI, R. B.; AMERO, P.; CAPASSO, R. 2023. Understanding the role of the gut microbiome in gastrointestinal cancer: A review. *Frontiers in Pharmacology*. 14:1130562. <https://doi.org/10.3389/fphar.2023.1130562>
- BANCALARI, E.; GATTI, M.; BOTTARI, B.; MORA, D.; ARIOLI, S. 2022. Disclosing *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* intraspecific diversity in exopolysaccharides production. *Food Microbiology*. 102:103924. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2021.103924>
- CASTRO, J.M.; TORNADIJO, M.E.; FRESNO, J.M. SANDOVAL, H. 2015. Biocheese: A food probiotic carrier. *BioMed Research International*. 2015(1):723056. <https://doi.org/10.1155/2015/723056>
- CEA, J.L.A. 2018. Importancia del lenguaje: Información y vocabulario del análisis sensorial en la cata de quesos. *ILE: Industrias lácteas españolas*. 40(460):30-46.
- ESCOBAR, M.C.; VAN TASSELL, M.L.; MARTÍNEZ-BUSTOS, F.; SINGH, M.; CASTAÑO-TOSTADO, E.; AMAYA-LLANO, S.L.; MILLER, M.J. 2012. Characterization of a Panela cheese with added probiotics and fava bean starch. *Journal of Dairy Science*. 95(6):2779-2787. <https://doi.org/10.3168/jds.2011-4655>
- FOX, P.F.; GUINEE, T.P.; COGAN, T.M.; MCSWEENEY, P.L. 2017. *Fundamentals of cheese science*. Ed. Springer. Boston. 271p.
- FUENTES-BERRIO, L.; ACEVEDO-CORREA, D.; GELVEZ-ORDOÑEZ, V.M. 2015. Alimentos funcionales: Impacto y retos para el Desarrollo y bienestar de la Sociedad Colombiana. *Biocología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*. 13(2):140-149. [https://doi.org/10.18684/BSAA\(13\)140-149](https://doi.org/10.18684/BSAA(13)140-149)

- GIBSON, G.R.; HUTKINS, R.; SANDERS, M.E.; PRESCOTT, S.L.; REIMER, R.A.; SALMINEN, S.J.; SCOTT, K.; STANTON, C.; SWANSON, K.S.; CANI, P.D.; VERBEKE, K.; REID, G. 2017. Expert consensus document: The International Scientific Association for Probiotics and Prebiotics (ISAPP) consensus statement on the definition and scope of prebiotics. *Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology*. 14(8):491-502. <https://doi.org/10.1038/nrgastro.2017.75>
- GONZÁLEZ-CÓRDOVA, A.F.; YESCAS, C.; ORTIZ-ESTRADA, Á.M.; DE LA ROSA-ALCARAZ, M.D.L.Á.; HERNÁNDEZ-MENDOZA, A.; VALLEJO-CORDOBA, B. 2016. Invited review: artisanal Mexican cheeses. *Journal of Dairy Science*. 99(5):3250-3262. <https://doi.org/10.3168/jds.2015-10103>
- HAMMAM, A.R.; AHMED, M.S. 2019. Technological aspects, health benefits, and sensory properties of probiotic cheese. *SN Applied Sciences*. 1:1113. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1154-4>
- HARUTOSHI, T. 2013. Exopolysaccharides of lactic acid bacteria for food and colon health applications. En: Kongo, M. *Lactic acid bacteria-R & D for food, health and livestock purposes*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/50839>
- HERNÁNDEZ-CERVANTES, M.; LÓPEZ-VELÁZQUEZ, J.; GÓMEZ-ALVARADO, T.; SANTIAGO-CABRERA, R.; RAMÓN-CANUL, L.G.; DELGADO-VIDAL, F.K.; SHAIN-MERCADO, A.J.; HUANTE-GONZÁLEZ, Y.; DE JESÚS RAMÍREZ-RIVERA, E. 2010. Comparación de la descripción sensorial del queso fresco “cuajada” mediante el análisis descriptivo cuantitativo y el perfil flash. *Ciencia y Mar*. 14(42):3-12
- HUGENHOLTZ, J.; SMID, E.J. 2002. Nutraceutical production with food-grade microorganisms. *Current Opinion in Biotechnology*. 13(5):497-507. [https://doi.org/10.1016/S0958-1669\(02\)00367-1](https://doi.org/10.1016/S0958-1669(02)00367-1)
- HUGHES, R.L.; ALVARADO, D.A.; SWANSON, K.S.; HOLSCHER, H.D. 2022. The prebiotic potential of inulin-type fructans: A systematic review. *Advances in Nutrition*. 13(2):492-529. <https://doi.org/10.1093/advances/nmab119>
- HUTCHINSON, N.T.; WANG, S.S.; RUND, L.A.; CAETANO-SILVA, M.E.; ALLEN, J.M.; JOHNSON, R.W.; WOODS, J.A. 2023. Effects of an inulin fiber diet on the gut microbiome, colon, and inflammatory biomarkers in aged mice. *Experimental Gerontology*. 176:112164. <https://doi.org/10.1016/j.exger.2023.112164>
- INTERNATIONAL DAIRY FOODS ASSOCIATION - IDFA. 2023. Pasteurization. International Dairy Foods Association. Washington, D.C. Disponible desde internet en: <https://www.idfa.org/pasteurization>
- JIMÉNEZ-GUZMÁN, J.; FLORES-NÁJERA, A.; CRUZ-GUERRERO, A.E.; GARCÍA-GARIBAY, M. 2009. Use of an exopolysaccharide-producing strain of *Streptococcus thermophilus* in the manufacture of Mexican Panela cheese. *LWT-Food Science and Technology*. 42(9):1508-1512. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2009.04.009>
- JUNGERSEN, M.; WIND, A.; JOHANSEN, E.; CHRISTENSEN, J.E.; STUER-LAURIDSEN, B.; ESKESEN, D. 2014. The Science behind the Probiotic Strain *Bifidobacterium animalis* subsp. lactis BB-12®. *Microorganisms*. 2(2):92-110. <https://doi.org/10.3390/microorganisms2020092>
- KARIMI, R.; AZIZI, M.H.; GHASEMLOU, M.; VAZIRI, M. 2015. Application of inulin in cheese as prebiotic, Fat Replacer and Texturizer: A Review. *Carbohydrate Polymers*. 119:85-100. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.11.029>
- KARIMI, R.; SOHRABVANDI, S.; MORTAZAVIAN, A. M. 2012. Sensory article: Sensory characteristics of probiotic cheese. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 11(5):437-452. <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2012.00194.x>
- MACHADO, M.; SOUSA, S.C.; RODRÍGUEZ-ALCALÁ, L.M.; PINTADO, M.; GOMES, A. M. 2023. Functional lipid enriched probiotic cheese: Gastrointestinal stability and potential health benefits. *International Dairy Journal*. 144:105700. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2023.105700>
- OBERG, T.S.; MCMAHON, D.J.; CULUMBER, M.D.; MCAULIFFE, O.; OBERG, C.J. 2022. Invited review: Review of taxonomic changes in dairy-related lactobacilli. *Journal of Dairy Science*. 105(4):2750-2770. <https://doi.org/10.3168/jds.2021-21138>
- PANDEY, K.R.; NAIK, S.R.; VAKIL, B.V. 2015. Probiotics, Prebiotics and symbiotic- A Review. *Journal of Food Science and Technology*. 52(12):7577-7587. <https://doi.org/10.1007/s13197-015-1921-1>
- POPPER, R. 2014. Use of just-about-right-scales in consumer research. En: *Novel Techniques in Sensory Characterization and Consumer Profiling*. Varela, P., y Ares, G. (Eds). CRC Press. Estados Unidos. p.137-156.
- PRANCKUTĖ, R.; KAUNIETIS, A.; KUISIENĖ, N.; ČITAVIČIUS, D.J. 2016. Combining prebiotics with probiotic bacteria can enhance bacterial growth and secretion of bacteriocins. *International journal of biological macromolecules*. 89:669-676. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.05.041>
- RANI, V.; YADAV, U.C. 2018. Functional food and human health. Ed. Springer. New York. 698p. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-1123-9>

- RAWI, M.H.; ZAMAN, S.A.; PA'EE, K.F.; LEONG, S.S.; SARBINI, S.R. 2020. Prebiotics metabolism by gut-isolated probiotics. *Journal of Food Science and Technology*. 57(8):2786-2799. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04244-5>
- ROLIM, F.R.; NETO, O.C.F.; OLIVEIRA, M.E.G.; OLIVEIRA, C.J.; QUEIROGA, R.C. 2020. Cheeses as food matrixes for probiotics: In vitro and in vivo tests. *Trends in Food Science & Technology*. 100:138-154. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.04.008>
- SHOAIB, M.; SHEHZAD, A.; OMAR, M.; RAKHA, A.; RAZA, H.; SHARIF, H. R.; SHAKEEL, A.; ANSARI, A.; NIAZI, S. 2016. Inulin: Properties, health benefits and food applications. *Carbohydrate polymers*. 147:444-454. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.04.020>
- STACHELSKA, M.A.; FOLIGNI, R. 2018. Development of a time-effective and highly specific quantitative real-time polymerase chain reaction assay for the identification of *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* and *Streptococcus thermophilus* in artisanal raw cow's milk cheese. *Acta Veterinaria Brno*. 87(3):301-308. <https://doi.org/10.2754/avb201887030301>
- TALBOT-WALSH, G.; KANNAR, D.; SELOMULYA, C. 2018. A review on technological parameters and recent advances in the fortification of processed cheese. *Trends in Food Science & Technology*. 81:193-202. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.09.023>
- TEGEGNE, B.A.; KEBEDE, B. 2022. Probiotics, their prophylactic and therapeutic applications in human health development: A review of the literature. *Heliyon*. 8(6):e09725. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09725>
- THOMPSON, M.S.; YAN, T.H.; SAARI, N.; SARBINI, S.R. 2022. A review: Resistant starch, a promising prebiotic for obesity and weight management. *Food Bioscience*. 101965. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.101965>
- TRESINA, P.S.; SELVAM, M.S.; DOSS, A.; MOHAN, V.R. 2022. Antidiabetic bioactive natural products from medicinal plants. *Studies in Natural Products Chemistry*. 75:75-118. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91250-1.00004-5>
- VILLENA, J.; VIZOSO-PINTO, M.G.; KITAZAWA, H. 2016. Intestinal innate antiviral immunity and immunobiotics: beneficial effects against rotavirus infection. *Frontiers in immunology*. 7:563. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2016.00563>
- WEMMENHOVE, E.; WELLS-BENNIK, M.H.J.; ZWIETERING, M.H. 2021. A model to predict the fate of *Listeria monocytogenes* in different cheese types—A major role for undissociated lactic acid in addition to pH, water activity, and temperature. *International Journal of Food Microbiology*. 357:109350. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2021.109350>



Modelo para la gestión de vulnerabilidades enfocado en la soberanía y seguridad alimentaria: caso de estudio Provincia Guantánamo

Vulnerabilities management model for the sovereignty and food safety: Case of study Guantánamo Province

Yousy Baby-Ramírez^{1*}; Liliana María Gómez-Luna²; Rosario León-Robaina²

¹Universidad de Guantánamo, Facultad de Ciencias Sociales y Humanísticas. Guantánamo, Cuba; e-mail: ybaby@cug.co.cu

²Universidad de Oriente, Centro de Electromagnetismo Aplicado. Santiago de Cuba, Cuba; e-mail: lilimagl@gmail.com; rosariolr@uo.edu.cu

*autor de correspondencia: ybaby@cug.co.cu

Cómo citar: Baby-Ramírez, Y.; Gómez-Luna, L.M.; León-Robaina, R. 2024. Modelo para la gestión de vulnerabilidades enfocado en la soberanía y seguridad alimentaria: caso de estudio Provincia Guantánamo. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 27(2):e2738. <http://doi.org/10.31910/rudca.v27.n2.2024.2738>

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 3 de 2024

Aceptado: septiembre 9 de 2024

Editado por: Adriana Posada Arrubla

RESUMEN

La soberanía y seguridad alimentaria son aspectos determinantes del desarrollo socioeconómico. Entre las amenazas para el logro de la soberanía alimentaria es importante considerar la insularidad. Cuba, al ser un estado insular, es más vulnerable a los impactos del cambio climático. El trabajo tiene como objetivo elaborar un modelo para la gestión de vulnerabilidades enfocado en la soberanía y seguridad alimentaria de la provincia Guantánamo. La investigación, de carácter cuali-cuantitativa, se desarrolló con una muestra constituida por tres municipios de la provincia Guantánamo, siendo los criterios de selección, la existencia de diferentes índices de vulnerabilidad alimentaria (considerando el índice propuesto por el PMA en Cuba), que sean municipios priorizados por el gobierno en el Estrategia de Desarrollo Provincial, municipios incluidos en polos productivos, multi-amenazados con implicaciones para la producción de alimentos y con bajos valores de índice de desarrollo humano. Se presenta un modelo para la gestión de vulnerabilidades en función del logro de la seguridad alimentaria, que incluye un diagnóstico inicial, a partir de indicadores, en el que se evalúan las amenazas, las vulnerabilidades y los factores condicionantes, para el logro de la soberanía alimentaria. Los resultados mostraron que las principales amenazas que afectan los municipios estudiados son las inundaciones por intensas lluvias, la intensa sequía, el cambio climático y los fenómenos hidrometeorológicos extremos; sin embargo, su impacto en cada contexto es diferente. Por ello, resulta necesario que los análisis de vulnerabilidades sean integrados, con enfoque interdisciplinar y de manera comparativa en América Latina y el Caribe.

Palabras claves: Derecho a la alimentación; Indicadores ambientales; Índice de desarrollo humano; Índice de vulnerabilidad alimentaria; Sistemas diversificados de producción.

ABSTRACT

The sovereignty and food safety are decisive aspects of the socioeconomic development. Among the threats for the achievement of the food sovereignty is important to consider the insularity. Cuba to the being an insular state, is more vulnerable to the impacts of the climatic change. The work has as objective to elaborate a model for the management of vulnerabilities focused in the sovereignty and food safety of the Guantánamo province. The investigation, of quali-quantitative character was developed with a sample constituted by three municipalities of the Guantánamo province, being the selection approaches the existence of different indexes of alimentary vulnerability (considering the index proposed by the PMA in Cuba) that are municipalities prioritized by the government in the Strategy of Provincial Development, municipalities included in productive poles, multi-threatened implications for the production of foods and with first floor values of index of human development. A model is presented for the management of vulnerabilities in function of the achievement of the food security that includes an initial diagnosis starting from indicators, in which the threats, vulnerabilities and conditioning factors are evaluated for the achievement of the food sovereignty. The results showed that the main threats that affect the studied municipalities are the floods for intense rains, the intense drought, the climatic change and the phenomena extreme hidrometeorológicos; however, its impact in each context is different. For it, it is necessary that the analyses of vulnerabilities are integrated, with focus interdisciplinary and in a comparative way in Latin America and the Caribbean.

Keywords: Diversified production systems; Environmental indicators; Food vulnerability index; Human development index; Right to food.

INTRODUCCIÓN

La soberanía alimentaria se define como “el derecho de los pueblos a definir sus propias políticas y estrategias sustentables de producción, comercialización y consumo de alimentos, que garanticen el derecho a la alimentación para toda la población con base en la pequeña y mediana producción, respetando sus propias culturas y la diversidad de los modos campesinos, pesqueros e indígenas de producción agropecuaria, de comercialización y gestión de los espacios rurales, en los cuales la mujer desempeña un papel fundamental. La soberanía alimentaria se asienta entonces en sistemas diversificados de producción basados en tecnologías ecológicamente sustentables” (FAO, 2012).

Para Cuba, la soberanía alimentaria tiene sustento legal en la Ley 148 del 2022, que la define como “la capacidad de la nación para producir alimentos de forma sostenible, y dar acceso a toda la población a una alimentación suficiente, diversa, balanceada, nutritiva, inocua y saludable, reduciendo la dependencia de medios e insumos externos, con respeto a la diversidad cultural y responsabilidad ambiental” (Asamblea Nacional del Poder Popular, 2022a). La soberanía y la seguridad alimentaria están íntimamente relacionadas con el desarrollo de una nación.

Conforme con la FAO: “existe seguridad alimentaria cuando a nivel de individuo, hogar, nación, y a nivel global se tiene acceso físico y económico a suficiente alimento, seguro y nutritivo, en todo momento, para satisfacer las necesidades alimenticias de los individuos e incluso sus preferencias, con el objeto de llevar una vida activa y sana” (FAO, 1996); por este motivo, se analiza a diferentes escalas, pero es el escenario local el que permite brindar soluciones efectivas en función de las necesidades territoriales (Baby Ramírez *et al.* 2022).

Cuba durante el período 2020-2022 tuvo una prevalencia de 2,5 % de personas subalimentadas (FAO *et al.* 2023), debido a la insuficiente producción, acopio, distribución y comercialización de los alimentos. Aspectos sociopolíticos y ambientales, como el impacto de eventos hidrometeorológicos extremos, la degradación progresiva de los recursos naturales; socioeconómicos, como el aumento de los precios de los alimentos, debido a la alta dependencia de las importaciones; sociales, relacionados fundamentalmente con las migraciones hacia zonas urbanas, entre otros factores, influyen de forma negativa en la producción de alimentos y la estabilidad de los suministros. De aquí, que la seguridad alimentaria sea una de las prioridades políticas, a nivel de país y se haya constituido en asunto de seguridad nacional.

Entre las amenazas para el logro de la soberanía alimentaria en Cuba es importante considerar la insularidad, que la hace vulnerable a los impactos del cambio climático. Diferentes iniciativas han sido desarrolladas para promover escenarios de resiliencia y salvaguardar vidas, como la Tarea Vida, Plan del Estado Cubano, que concibe elevar la percepción del riesgo, aumentar el nivel de conocimiento y fomentar, desde el enfoque participativo, un desarrollo resiliente; sin embargo, aun cuando existen avances, a nivel nacional, su

impacto en la seguridad alimentaria a escala local aún es limitado y se dificulta la implementación de medidas adecuadas, en función de un desarrollo sostenible.

En el contexto cubano, la provincia de Guantánamo cobra especial interés, debido a las singularidades ambientales y a la heterogeneidad en los análisis de riesgos (ONEI, 2021), lo que, indudablemente, tiene implicaciones en los modos de hacer, para el logro de la seguridad alimentaria. Se registran zonas que reciben el impacto de prolongados períodos de sequía, presentan alto índice de aridez y salinización de las tierras, mientras otras zonas sufren los efectos de fuertes vientos y lluvias, con la presencia de inundaciones, deslizamientos y penetraciones del mar.

En un escenario tan complejo y contrastante, donde el 75 % del territorio es montañoso (ONEI, 2021), se ubica, además, el llamado corredor seco de Cuba (CITMA, 2019), con suelos poco productivos y baja superficie de riego, por lo que las actividades agrícolas son totalmente dependientes del comportamiento climático (CITMA, 2019). Por tanto, la gestión de la seguridad y soberanía alimentaria se dificulta y su abordaje no puede estar basado en generalizaciones o experiencias trasladadas desde otros escenarios; incluso, cada municipio necesita un análisis que considere sus singularidades, lo que, hoy, constituye un reto para la ciencia. De aquí, que sea necesario enfocarse en un modelo de gestión de vulnerabilidades para el logro de la soberanía y seguridad alimentaria en esta provincia.

Los modelos de gestión tienen sustento teórico en los aportes de Aguilar *et al.* (2002), quienes señalan que su diseño tiene sus bases históricas en la administración y la gerencia de principios del siglo XX, con las contribuciones de Frederick W. Taylor, sobre los procedimientos para optimizar la eficiencia y la productividad. Posteriormente, Henry Fayol estableció y asoció al término de gestión a los procesos administrativos de planificación, organización, dirección, coordinación y control.

Autores, como Huertas López *et al.* (2020), sostienen que un modelo es una representación abstracta de un fenómeno o realidad dada, que debe estar sustentado en determinadas relaciones esenciales que lo refuerzan teóricamente y está estructurado en un conjunto de componentes principales: objetivo, premisas, principios, cualidades, enfoques y momentos fundamentales. Su implementación exige, entonces, una metodología o procedimiento, que responda a las exigencias y las particularidades de este.

Por lo tanto, el objetivo de esta investigación fue desarrollar un modelo para la gestión de vulnerabilidades enfocado en la soberanía y seguridad alimentaria, focalizado en la escala municipal, la integración de actores clave y la adaptación y mitigación al cambio climático.

MATERIALES Y MÉTODOS

El área geográfica donde se realizó el estudio estuvo enmarcada en la provincia Guantánamo, en la que se seleccionan tres municipios,

a partir de criterios o indicadores preestablecidos: Índice de vulnerabilidad alimentaria (PMA, 2001), Municipios priorizados por el gobierno, Municipios polos productivos, Municipios multi-amenazados, Índice de Desarrollo Humano (IDH), Municipios emisores o receptores de alimentarios.

Se incluyen asentamientos, tanto rurales como urbanos. La población objeto de análisis fue la residente permanente en viviendas particulares, aplicándose los instrumentos elaborados para la recogida de información, a aquellas personas encargadas de las compras y de la alimentación de la familia, cuyas características, realidades socioeconómicas y culturales fueran diferentes, buscando variedad de visiones, comportamientos y posturas, a través de la representatividad de familias de diferentes tipos de conformación. El proceso investigativo de campo se desarrolló de enero 2022 a diciembre de 2023.

Método de muestreo. Se usó el probabilístico, el aleatorio simple y el aleatorio estratificado, considerando en cada municipio y en los Consejos Populares, una subpoblación o estrato con las viviendas habitadas, donde las viviendas se escogieron con iguales probabilidades dentro de cada asentamiento o lugar habitado, efectuándose la unión de las familias, en el caso de existir menos de 45 viviendas. La distribución de la muestra por asentamientos o lugares habitados se realizó con una distribución proporcional al total de viviendas particulares de cada uno. La estratificación aumentó la precisión de la muestra y posibilitó el uso deliberado de diferentes tamaños de muestra para cada estrato (Hernández Sampieri *et al.* 2003).

El tamaño de la muestra total obtenida para la provincia de Guantánamo fue de 250 hogares de los 3 municipios seleccionados para la aplicación de encuestas, a través de la expresión para el cálculo de muestra en poblaciones finitas conocidas (Calero, 1978). Durante el trabajo de campo se estudiaron los 250 hogares, con un nivel de respuesta de la población muy alto; el 100 % de las personas posibles de entrevistar participaron en el estudio.

Talleres metodológicos. En cada municipio se realizaron cinco talleres metodológicos, con profesionales relacionados con la gestión de riesgos, gestión del desarrollo y con el sector agrícola, para realizar identificación y valoraciones puntuales de amenazas, vulnerabilidades, a través de las matrices de vulnerabilidad. Se consultaron, además, a expertos para la validación del modelo de indicadores y factores condicionantes. Los talleres permitieron concretar aspectos relacionados con el diagnóstico situacional y el análisis de las encuestas.

Diagnóstico situacional. El marco metodológico para la realización del diagnóstico se determinó a partir del procedimiento metodológico orientado al diagnóstico situacional, con fines de gestión de los riesgos para el desarrollo local, a nivel municipal (Guasch *et al.* 2011). Estuvo enfocado en aspectos relacionados con la soberanía y seguridad alimentaria, considerando los tres componentes de vulnerabilidad, expresados en las variables de exposición, sensibilidad y capacidad adaptativa.

Los indicadores que componen la variable exposición la constituyen la población más expuesta a sufrir inseguridad alimentaria; los indicadores que conforman la variable sensibilidad caracterizan la condición que hace que las personas sean susceptibles a sufrir inseguridad alimentaria y, por último, los indicadores de capacidad adaptativa, representan el potencial, las habilidades y los recursos para hacer frente a la inseguridad alimentaria (Haro Mota & Marcelaño Flores, 2019).

Se consideraron las dimensiones del desarrollo sostenible: social, económica y ambiental, lo que establece la Ley 148/2022, el informe PMA Cuba (2001) y el plan de desarrollo de la provincia Guantánamo, con el interés de introducir y evaluar indicadores demostrativos de diferentes estados y manifestación del desarrollo socioeconómico de los municipios seleccionados.

Selección y validación de indicadores y del modelo propuesto.

Para la selección de indicadores del estado situacional de los municipios se realizó una consulta previa con profesionales del territorio, vinculados a la gestión ambiental o de riesgos y a la producción de alimentos, incluida la Comisión de Seguridad y Soberanía alimentaria, a nivel provincial. Esta acción se materializó en un taller metodológico, que involucró tomadores de decisión, la Plataforma Articulada para el Desarrollo Integral Territorial (PADIT), profesionales que desarrollan proyectos en los municipios seleccionados y profesores de la Facultad de Ciencias Sociales y Humanísticas, de la Facultad Agroforestal de Montaña y del Centro de Estudios para el Desarrollo Local Sostenible de la Universidad de Guantánamo. Los indicadores que se utilizaron se seleccionaron considerando que tuvieran relación con algún elemento de seguridad alimentaria, disponibilidad, acceso, estabilidad y utilización biológica de los alimentos. Posteriormente, se realizó una consulta con 17 expertos relacionados con la gestión de la seguridad alimentaria. Para la validación del modelo y los indicadores clave para su operacionalización, se usó, como referencia, el Método Delphi, que consiste en una técnica de obtención de información, basada en la consulta a expertos, con el fin de lograr la opinión de consenso más fiable del grupo consultado.

Selección de expertos. Para la selección de los expertos se tuvieron en cuenta los siguientes criterios: prestigio y profesionalidad, reconocidos a nivel social; haber tenido relación laboral docente o práctica con la actividad de seguridad alimentaria o gestión de la producción de alimentos; tener cinco años de experiencia, como mínimo, en estas actividades; tener conocimiento del área geográfica donde se desarrolla la investigación.

Para la selección de los expertos se evaluó el Coeficiente de Competencia de cada uno de ellos, en función del coeficiente de conocimiento o información (Kc) y el coeficiente de argumentación (Ka); para ello, se siguieron los pasos que se detallan a continuación: 1) el coeficiente de conocimiento o información (Kc) se calcula sobre la base de la autovaloración del propio experto, respecto del conocimiento o información que considera tener acerca de los temas sobre los que se le consulta, mediante una serie de preguntas, que debe valorar en una escala de 0 a 10 puntos, donde el valor

inferior (0) indica absoluto desconocimiento y el superior (10), el pleno conocimiento de la referida problemática.

Entre los temas destaca: seguridad alimentaria, índices de vulnerabilidad alimentaria, modelos de gestión de la seguridad alimentaria, entre otros. El coeficiente K_c de cada experto, se calcula mediante la expresión ($K_{cj}=n_j*0,1$), donde: K_{cj} : coeficiente de conocimiento o información del experto “j”, y n_j : rango seleccionado por el experto “j”. El cálculo del coeficiente de argumentación K_a se establece presentándole al candidato una tabla patrón, en la que marcará una cruz en una de las casillas, según su criterio (Herrera Maso *et al.* 2022). La tabla de selección de fuentes de argumentación incluye preguntas como: ¿Sería Ud. capaz de elegir indicadores para operacionalizar un modelo de gestión de la seguridad alimentaria? entre otras. Se aplica la fórmula $K_{aj} = \sum_{i=1}^n n_i$, donde K_{aj} = coeficiente de argumentación del participante “j” y n_i : valor correspondiente a la fuente de argumentación “i” (i: 1 hasta 9).

Para obtener el coeficiente de competencia (K), se tuvo en cuenta la ecuación: $K=K_{cj}+K_{aj}/2$, donde K_j : es el coeficiente de competencia del participante “j” y K_{aj} : coeficiente de argumentación del participante “j”. Los criterios de selección de competencia fueron: coeficiente de competencia alta: $0,8 < K <$

1,0, coeficiente de competencia media: $0,5 < K < 0,8$ y coeficiente de competencia baja: $K < 0,5$. Los 17 expertos seleccionados tuvieron valores de $K>0,7$. Estos pertenecen a la Universidad de Guantánamo, CITMA Guantánamo, Delegación Provincial de Recursos Hidráulicos y Delegación Provincial de la Agricultura de la provincia e investigadores de la Universidad de Oriente y BIOECO, Santiago de Cuba. Estos participaron en la valoración de factores condicionantes, selección de indicadores clave y validación del modelo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características generales de los municipios seleccionados. La provincia de Guantánamo se encuentra ubicada en la parte más oriental de la República de Cuba. El 82 % del territorio provincial es montañoso y está conformado por 10 municipios, con 389 asentamientos, de los cuales, 18 son urbanos (Gobierno Provincial del Poder Popular, 2022). Se seleccionan 3 municipios piloto para el desarrollo de esta investigación: El Salvador, Caimanera y Niceto Pérez García. La selección se realizó mediante una caracterización previa y un estudio exploratorio-descriptivo en función de la seguridad alimentaria, teniendo en cuenta criterios de selección previamente definidos (Tabla 1).

Tabla 1. Indicadores preestablecidos de selección de los municipios de la provincia Guantánamo.

No.	Municipios de la provincia Guantánamo	Índices de vulnerabilidad alimentaria (PMA, 2001)	Municipios priorizados por el gobierno	Municipios polos productivos	Municipios multi-amenazados	IDH	Municipios emisores o receptores de alimentarios
1.	San Antonio del Sur	Muy vulnerable	X	X	X	0,5700	Emisor
2.	Imías	Muy vulnerable			X	0,5675	Emisor
3.	Baracoa	Muy vulnerable	X	X	X	0,5575	Emisor
4.	Caimanera	Poco vulnerable	X		X	0,5450	Receptor
5.	Yateras	Muy vulnerable	X		X	0,5300	Emisor
6.	Maisí	Muy vulnerable			X	0,5225	Emisor
7.	Niceto Pérez García	Muy vulnerable		X	X	0,5075	Emisor
8.	Manuel Tames	Muy vulnerable			X	0,4675	Emisor
9.	El Salvador	Muy vulnerable		X	X	0,4675	Emisor
10.	Guantánamo	Muy vulnerable	X		X	0,4475	Receptor

IDH: índice de desarrollo humano.

El municipio El Salvador se ubica en la parte noroeste de la provincia, presenta un clima tropical húmedo de selva (Af), tipo lluvioso, todo el año. Los suelos del territorio son totalmente fértiles, de lo cual, depende la economía, basada, fundamentalmente, en la actividad agropecuaria. Los principales agroecosistemas son el cañero en el llano y cafetalero, en la montaña.

Caimanera es un municipio ubicado en el Sur de la provincia Guantánamo, regida por un clima con características semidesérticas, con temperaturas altas y escaso régimen de lluvias. Tiene elevada salinidad, por la alta evaporación solar y la escasez de lluvia. Forma parte del llamado semi-desierto cubano. Presenta suelos aluviales de arcillas sobre calizas y areniscas, muy escabrosos y de uso agrícola bastante limitado.

El municipio Niceto Pérez García se ubica en la parte suroeste de la provincia Guantánamo y forma parte de la faja costera sur; las lluvias constituyen un factor limitante para el crecimiento y el desarrollo de los cultivos, porque presentan un acumulado medio anual relativamente pobre, una gran variabilidad interanual y una distribución temporal poco favorable. Históricamente, el municipio presenta períodos secos o poco lluviosos y, con frecuencia, se observan comportamientos extremos, con fuertes impactos en la agricultura. La mayor parte de los suelos del municipio son frágiles,

en los cuales, el desarrollo agrícola depende de un alto grado de eficiencia y cuidado, para no romper el equilibrio existente entre las áreas montañosas y de pendiente elevada, con alto riesgo de erosión y las llanuras acumulativas con riesgo de salinización.

A partir de entrevistas realizadas a las autoridades municipales y en los hogares de los municipios, objeto de estudio, se identificaron un total de 10 factores condicionantes de inseguridad alimentaria (Tabla 2), valorados por el equipo de trabajo y expertos seleccionados.

Tabla 2. Resumen de los indicadores más relevantes para el análisis integral de la heterogeneidad de los municipios objeto de estudio para el logro de la soberanía y seguridad alimentaria.

Indicadores	Expresión	El Salvador	Caimanera	Niceto Pérez
Población				
1. Población total (miles de habitantes)+	PT	41,420	11,273	16,181
2. Población de 0-14 años y mayores de 70 años (vulnerable) (% respecto a la población total)+	PV	27	49	28
Uso de la tierra				
3. Superficie agrícola (% respecto a la superficie total del municipio)++	SA	50,05	1,81	74,03
Formas de organización productiva para el desarrollo agrícola				
4. Total (No. Total)++	FOP-DA	53	12	27
Amenazas y vulnerabilidades				
5. Total de puntos en la valoración de vulnerabilidades	V	613	631	617
6. Total de puntos en la valoración de amenazas	A	603	428	418
Capacidad de respuesta y efectividad de los planes de desarrollo municipal				
7. No. de proyectos de desarrollo agrícola en ejecución en un quinquenio (No. Total)*	PD	4	0	4
8. Satisfacción actual de necesidad de alimentos (%)*	SNA	41	21	35
9. Vulnerabilidades atendidas en los planes de desarrollo (% vulnerabilidades atendidas con acciones concretas en el municipio/ total de vulnerabilidades)*	VPD	50	60	50

Leyenda: (+) Datos obtenidos de ONEI (2021), (++) Asamblea Municipal del Poder Popular (2023a; 2023b y 2023c), (*) Gobierno Provincial del Poder Popular (2022).

Modelo de gestión de vulnerabilidades para la soberanía y seguridad alimentaria. Para el desarrollo de esta investigación se asume el modelo teórico que utiliza símbolos para designar las propiedades del sistema real, el que tiene la capacidad de representar las características, los elementos, las estructuras y las relaciones fundamentales del fenómeno, proporcionar explicaciones y sirve como guía para generar hipótesis teóricas (Pérez Rodríguez, 1996); cumple con un objetivo y considera el municipio como un todo (Figura 1).

El modelo tiene como objetivo contribuir al logro de la soberanía alimentaria desde la gestión de vulnerabilidades, considerando aspectos relacionados con el impacto del cambio climático, para evaluar, de manera integral, la vulnerabilidad alimentaria y los

factores que la condicionan, en función de fortalecer zonas o grupos vulnerables, aumentar la capacidad de gestión de las autoridades locales e implementar planes para el uso sostenible de los recursos naturales, en función de la alimentación, el bienestar humano y el desarrollo resiliente (Asamblea Nacional del Poder Popular, 2022b).

Como entradas del modelo se proponen: el Marco legal e Institucional, la Estrategia de Desarrollo Provincial y Municipal, la Red de actores, los planes de producción agrícola y de la economía. La Estrategia de Desarrollo Provincial (EDP), que establece las políticas, programas y proyectos con alcance provincial al mismo tiempo que los lineamientos y las políticas para la elaboración de las Estrategias de Desarrollo Municipal (EDM).

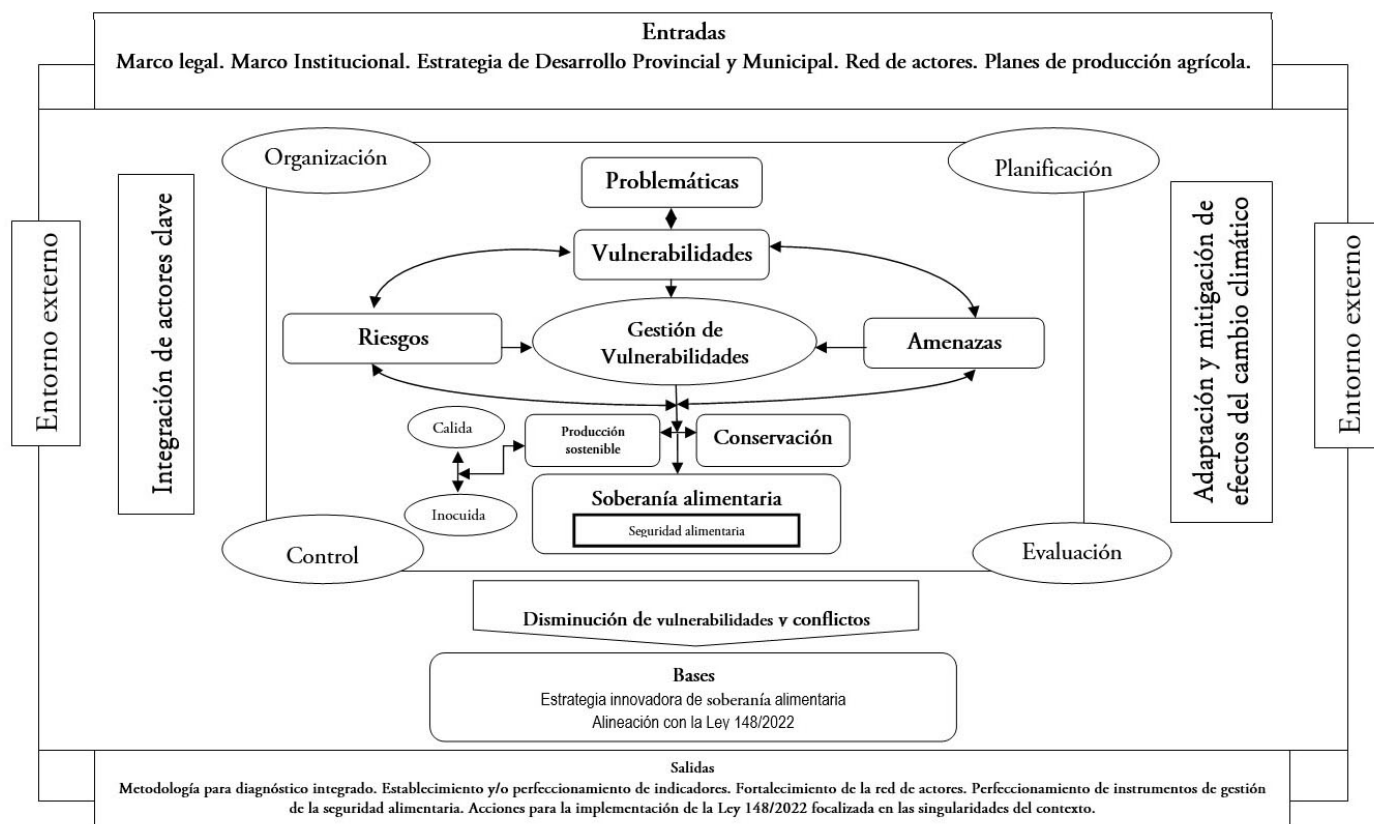


Figura 1. Modelo de gestión de vulnerabilidades para la soberanía y seguridad alimentaria

El modelo tiene en su centro la gestión de vulnerabilidades para la identificación de los riesgos, amenazas, vulnerabilidades y problemáticas, que limitan la conservación y la producción sostenible de alimentos con calidad e inocuidad, para lograr la soberanía y seguridad alimentaria. Las etapas fundamentales del componente procesal del modelo son: organización, planificación, evaluación y control (Ciclo de Deming), en función de la disminución de las vulnerabilidades y conflictos; tendrá como salida una estrategia innovadora para la implementación de la Ley de Soberanía Alimentaria, Seguridad Alimentaria y Nutricional (SAN), a nivel municipal y el logro, como meta final de la soberanía alimentaria.

Considera, como aspecto relevante, la integración de los actores claves y la adaptación y mitigación de los efectos del cambio climático. La salida del modelo está dada a la contribución, de manera directa, al perfeccionamiento del proceso de gestión de la soberanía y seguridad alimentaria, a escala municipal, a través de una metodología para el diagnóstico integrado, el establecimiento o perfeccionamiento de indicadores, fortalecimiento de la red de actores y de los sistemas alimentarios locales, el perfeccionamiento de instrumentos de gestión de la seguridad alimentaria y acciones para la implementación de la Ley 148/2022, focalizada en las singularidades del contexto municipal, validado para la provincia Guantánamo.

Para la implementación práctica del modelo se diseñó una estrategia innovadora (Tabla 3), entendida como la forma concreta

de desarrollar el proceso de gestión, a través de etapas y pasos que la integran, con la finalidad de cumplir un objetivo.

Indicadores e índice sintético para la operacionalización del modelo.

Los indicadores ambientales para evaluar la seguridad alimentaria propuestos permiten evaluar situaciones actuales y tendencias de la seguridad alimentaria regional y familiar, siendo claves la población total, población económicamente activa, población vulnerable, superficie agrícola, formas de organización productiva para el desarrollo agrícola, impactos de las vulnerabilidades sobre la población, proyectos de desarrollo agrícola, satisfacción actual de necesidad de alimentos y las vulnerabilidades atendidas en los planes de desarrollo municipal.

A partir de estos indicadores se formula el Índice Sintético Integrado de Vulnerabilidad Alimentaria Municipal (ISIVAM):

$$\text{ISIVAM} = ((A+B) / C) / 4000$$

$$\text{Donde } A = (a \times v) * F_c$$

A es el componente de riesgos, que considera las variables a: resultado de valoración de las amenazas; v: resultado de la valoración de las vulnerabilidades y F_c : resultado de la valoración de la influencia de los factores condicionantes.

$$\text{Donde } B = (P_t / S_a) * P_v$$

B es el componente de exposición y considera las variables, Pt: población total; Sa: superficie agrícola y Pv: población vulnerable (en porcentaje).

Y el componente C= (Pr+va+Ap)*S

Por último, C es el componente de capacidad de respuesta adaptativa y considera las variables P: proyectos relacionados con la producción de alimentos desarrollados en el municipio; va: vulnerabilidades atendidas en los planes de desarrollo municipales; Ap: arreglos productivos locales y S: porcentaje de satisfacción sobre la oferta de alimentos. El número 4000 es un factor de corrección de los datos obtenidos para llevarlo a una escala de 10 (Figura 2).

De acuerdo con los resultados del índice y en concordancia con el diagnóstico situacional (Tabla 4), el más vulnerable es el municipio de Caimanera, por tener mayores vulnerabilidades, amenazas y riesgos, destacando su ubicación en una zona con características semidesérticas, suelos salinizados con aridez y mal drenaje, cuyo uso agrícola es muy limitado. Además, no cuenta con una infraestructura agroindustrial que satisfaga las exigencias del programa alimentario, por las regulaciones y el control fronterizo, debido a la presencia de la Base Naval de EE. UU., por lo que no tiene proyectos de colaboración internacional y es limitado el intercambio socioeconómico y cultural con otros territorios de la provincia y el país. Se ubica, además, en las márgenes de la bahía de Guantánamo, ecosistema muy contaminado.

Tabla 3. Factores condicionantes de inseguridad alimentaria en los tres municipios de la provincia Guantánamo.

No.	Factores condicionantes	El Salvador	Caimanera	Niceto Pérez	Referencias
1.	Fluctuaciones locales de los precios de los alimentos.	Muy alto impacto	Muy alto impacto	Muy alto impacto	Pérez Garcés & Silva Quiroz (2019)
		5	5	5	
2.	Familias con bajos ingresos.	Muy alto impacto	Muy alto impacto	Alto impacto	Castell <i>et al.</i> (2015)
		5	5	4	
3.	Escases de alimentos de alta demanda.	Impacto moderado	Muy alto impacto	Alto impacto	Del Castillo <i>et al.</i> (2012)
		3	5	4	
4.	Regulaciones de la venta de productos básicos.	Impacto Moderado	Muy alto impacto	Impacto Moderado	FAO <i>et al.</i> (2023)
		3	5	3	
5.	Insuficiente cantidad, variedad, calidad, inocuidad y estabilidad de los alimentos.	Impacto Moderado	Muy alto impacto	Alto impacto	Pérez Garcés & Silva Quiroz, (2019)
		3	5	4	
6.	Incertidumbres para obtener alimentos por falta de dinero u otros recursos.	Alto impacto	Muy alto impacto	Alto impacto	PMA (2020)
		4	5	4	
7.	Habitar localidades aisladas y carentes de accesos a las carreteras.	Alto impacto	Muy alto impacto	Alto impacto	Haro Mota & Marceléño Flores (2019)
		4	5	4	
8.	Hogares con niños menores de edad y adultos mayores de 70 años (población vulnerable).	Alto impacto	Muy alto impacto	Muy alto impacto	Candela, (2016)
		4	5	5	
9.	Falta de cultura para el consumo responsable de alimentos en términos de inocuidad.	Alto impacto	Muy alto impacto	Alto impacto	Taller con Expertos
		4	5	4	
10.	Falta de vigilancia de los órganos de control sobre la procedencia de los alimentos.	Alto impacto	Muy alto impacto	Alto impacto	Taller con Expertos
		4	5	4	
11.	Inestabilidad en la estructura de gobierno.	Alto impacto	Muy alto impacto	Alto impacto	Taller con Expertos
		4	5	4	
Total		43	55	45	

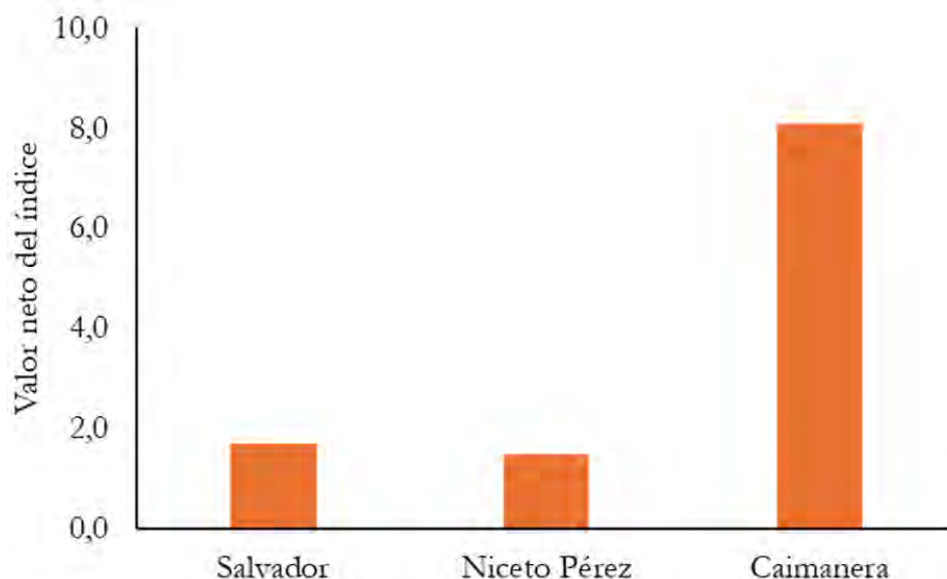


Figura 2. Variación del Índice Sintético Integrado de Vulnerabilidad Alimentaria Municipal, en municipios seleccionados de la provincia Guantánamo.

Tabla 4. Etapas y pasos de la estrategia innovadora para implementar el modelo de gestión de vulnerabilidades para la soberanía y la seguridad alimentaria.

ETAPAS	PASOS
Etap 1. Organización	- Elaboración de cronogramas para la ejecución de los diagnósticos integrados. - Establecimiento de las relaciones formales con los actores claves municipales.
Etap 2. Planificación	- Caracterización del entorno externo. - Diagnósticos integrados, teniendo en cuenta los indicadores propuestos. - Identificación de amenazas, de riesgos de y vulnerabilidades.
Etap 3. Evaluación	- Análisis de los datos y procesamiento de la información. - Evaluación del estado actual de la soberanía y seguridad alimentaria en los municipios.
Etap 4. Acompañamiento y Control	- Implementación de un plan de capacitación. - Conciliación con el gobierno y las comisiones municipales para la implementación de Ley 148/2022 de Soberanía y seguridad alimentaria y nutricional. - Aplicación de instrumentos de análisis y de evaluación al resto de los municipios. - Adaptación y revisión del plan de desarrollo integral de los municipios de la provincia Guantánamo. - Evaluación de los resultados e impacto del Modelo de gestión de vulnerabilidades para la soberanía y seguridad alimentaria en los municipios de la provincia Guantánamo.

En Caimanera existen áreas inundables por la presencia de una red de acueducto y alcantarillado en mal estado e inconcluso. Hay notables afectaciones por la erosión y acciones antrópicas en las laderas inclinadas (Norte y Sur), ocasionando derrumbes, donde sobresalen instalaciones y viviendas; de aquí, que existan limitaciones del espacio físico para nuevos asentamientos poblacionales. Al riesgo sísmico se le adiciona el efecto de la licuefacción, en general, es un municipio altamente vulnerable a los desastres naturales, antropogénicos y tecnológicos, así como aquellos relacionados con el efecto del cambio climático, como las frecuentes sequías y los incendios forestales. El municipio Caimanera presenta alta degradación ambiental y esta herramienta corrobora su alta vulnerabilidad alimentaria.

El Salvador tiene cinco amenazas relevantes para la seguridad alimentaria, tales como: las inundaciones por intensas lluvias, el deficiente funcionamiento del sistema de drenaje y alcantarillado, sumideros naturales obstruidos, canales tapados en mal estado, vertimiento de aguas albañales y residuales a los ríos.

Tiene zonas sin energía eléctrica suficiente para implementar sistemas de riego; presenta insuficiente infraestructura para el acopio y comercialización de los productos, así como para el procesamiento industrial y déficit equipamiento e insumos necesarios para el proceso productivo, tanto agrícola como industrial; existencia de viales en mal estado, que dificulta la comercialización y la transportación de los alimentos desde las zonas montañosas; existe migración de habitantes de la localidad hacia la cabecera provincial; envejecimiento poblacional y baja tasa de natalidad.

El municipio Niceto Pérez García presenta amenazas que limitan la seguridad alimentaria, destacándose: la intensa sequía; insuficiente fuerza de trabajo y limitaciones con los insumos y con el transporte; poca disponibilidad de área bajo riego para la producción de alimentos; suelos de baja categoría agro productivas y limitantes causadas por los procesos naturales y antrópicos, con alta incidencia en la producción de alimentos; vulnerabilidad a los desastres naturales y tecnológicos; proceso de deterioro del fondo habitacional, que supera las acciones constructivas implementadas para su recuperación; urbanización incompleta (acueducto y alcantarillado y viales), tanto en la zona de nuevo desarrollo como en los asentamientos ya establecidos; mal estado técnico de los viales, los que vinculan a los asentamientos de mayor productividad, así como insuficiente asignación de recursos materiales y financieros, para el desarrollo agrícola.

El diagnóstico situacional de los municipios seleccionados de la provincia Guantánamo permitió identificar las singularidades de cada entorno; vulnerabilidades, amenazas y riesgos ambientales preexistentes, que afectan la seguridad alimentaria, que no son consideradas debidamente en la gestión de la seguridad alimentaria. Las principales amenazas que afectan los municipios estudiados son las inundaciones por intensas lluvias, la intensa sequía, el vertimiento de aguas albañales y residuales a los ríos, el cambio climático y los fenómenos hidrometeorológicos extremos; sin embargo, su impacto en cada contexto es diferente.

En los municipios seleccionados de la provincia de Guantánamo, las vulnerabilidades están condicionadas por aspectos físicos, estructurales, sociales, económicos, ambientales y alimentarios, siendo las principales amenazas las inundaciones por intensas lluvias, la intensa sequía, el vertimiento de aguas albañales y residuales a los ríos, el cambio climático y los fenómenos hidrometeorológicos extremos, siendo su manifestación diversa en cada municipio, aspecto que hay que considerar para la gestión de vulnerabilidades, con énfasis en la social, factor limitante para el logro de la soberanía alimentaria.

El modelo de gestión de vulnerabilidades para la soberanía y seguridad alimentaria en los municipios de la provincia Guantánamo y la estrategia para su implementación permiten articular los actores claves, según su rol, alcance, posición y poder en la producción, la transformación y la comercialización de alimentos; además, cada municipio se analiza haciendo énfasis en sus singularidades. Su operacionalización, a través del índice sintético integrado de vulnerabilidad alimentaria municipal (ISIVAM), resulta exitosa, siendo ambos altamente valorado por los expertos.

El ISIVAM ofrece varias ventajas: integra varias dimensiones y componentes del análisis de riesgos; considera criterios cuantitativos y cualitativos determinantes, fácilmente manejables; involucra expertos y actores clave.

Los criterios e indicadores que facilitarán la aplicación del modelo y el análisis del contexto, a través de los diagnósticos, contribuirán a la toma de decisiones con relación a la implementación de

estrategias para fomentar la seguridad alimentaria en la provincia de Guantánamo.

Se confirma la ausencia de homogeneidad territorial en los análisis de vulnerabilidad alimentaria, aspecto que es necesario considerar para implementar la Ley SAN en las diferentes provincias; de aquí la relevancia del municipio, como unidad de gestión en el modelo propuesto.

Los resultados indican que los análisis de vulnerabilidades tienen que ser integrados, con enfoque interdisciplinar y de manera comparativa en América Latina y el Caribe.

Agradecimientos. A los miembros de la Comisión de Seguridad y Soberanía alimentaria a nivel provincial, a los profesionales de la Plataforma Articulada para el Desarrollo Integral Territorial (PADIT), a los profesores de la Facultad de Ciencias Sociales y Humanísticas, de la Facultad Agroforestal de Montaña y del Centro de Estudios para el Desarrollo Local Sostenible de la Universidad de Guantánamo por su tiempo y apoyo institucional. **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 presentados. El presente artículo es parte de la tesis doctoral: “Modelo de gestión de vulnerabilidades para la soberanía alimentaria: caso de estudio provincia Guantánamo” del programa Ciencias Ambientales de la Universidad de Oriente, Santiago de Cuba. **Contribución de los autores:** Yousy Baby Ramírez, análisis formal, escritura, curación de datos, investigación, revisión y edición; Liliana María Gómez Luna, metodología, curación de datos, supervisión, revisión y edición y Rosario León Robaina, análisis formal y revisión y edición.

REFERENCIAS

- AGUILAR, J.; AGUIRRE, I.; MORANTES, W.; ESPINOZA, Y. 2002. Metodología para la elaboración de un modelo de gestión en una institución pública venezolana: Fundacite-Mérida. *Interciencia*. 27(6):293-298.
- ASAMBLEA NACIONAL DEL PODER POPULAR. 2022a. Gaceta Oficial No. 77 Ordinaria de 28 de julio de 2022. Ley 148/2022 “Ley de Soberanía Alimentaria y Seguridad Alimentaria y Nutricional”. Decreto 67/2022 “Reglamento de la Ley de Soberanía Alimentaria y Seguridad Alimentaria y Nutricional”. Disponible desde Internet en: https://www.ics.gob.cu/wp-content/uploads/2024/02/goc-2022-o77_Ley_de_soberana_alimentaria.pdf
- ASAMBLEA NACIONAL DEL PODER POPULAR. 2022b. Gaceta Oficial No. 87 Ordinaria de 13 de septiembre de 2023. Ley 150/2022 “Del Sistema de los Recursos Naturales y el Medio Ambiente”. Disponible desde Internet en: <https://www.parlamentocubano.gob.cu/sites/default/files/documento/2023-10/goc-2023-o87.pdf>

- ASAMBLEA MUNICIPAL DEL PODER POPULAR. 2023a. Estrategia de Desarrollo Municipal 2020-2030. Consejo de la Administración de El Salvador. p.1-45.
- ASAMBLEA MUNICIPAL DEL PODER POPULAR. 2023b. Estrategia de Desarrollo Municipal Caimanera 2020-2030. Consejo de la Administración de Caimanera. p.1-54.
- ASAMBLEA MUNICIPAL DEL PODER POPULAR. 2023c. Estrategia de Desarrollo Municipal Niceto Pérez García 2020-2030. Consejo de la Administración de Niceto Pérez García. p.1-50.
- BABY RAMÍREZ, Y.; GÓMEZ LUNA, L.M.; SALAS VINENT, M.E. 2022. La seguridad alimentaria familiar en el contexto de la crisis epidemiológica por la COVID-19. *Revista Estudios del Desarrollo Social: Cuba y América Latina*. 10(2):38-50.
- CALERO, A. 1978. *Técnicas de Muestreo*. Editorial Pueblo y Educación. La Habana, Cuba. 514p.
- CANDELA, Y. 2016. Seguridad alimentaria en Venezuela: una mirada desde el ciudadano vulnerable. *Cuadernos del CENDES*. 33(91):125-39.
- CASTELL, G.; CRUZ DE LA, J.N.; PÉREZ, C.; ARANCETA, J. 2015. Escalas de evaluación de la inseguridad alimentaria en el hogar. *Revista Española de Nutrición Comunitaria*. 21(1):270-276. <https://doi.org/0.14642/RENC.2015.21.sup1.5074>
- DEL CASTILLO, S.E.; PATIÑO, G.A.; HERRÁN, Ó.F. 2012. Inseguridad alimentaria: variables asociadas y elementos para la política social. *Biomédica*. 32:545-556.
- MINISTERIO DE CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE DE CUBA, CITMA. 2019. Estudios de peligro, vulnerabilidad y riesgos sísmicos en Caimanera. Subdelegación de Medio Ambiente. CITMA. Guantánamo.
- ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA, FAO. 1996. Informe de la Cumbre Mundial sobre la Alimentación. Disponible desde Internet en: <https://www.fao.org/4/w3548s/w3548s00.htm>
- ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA, FAO. 2012. Ley marco derecho a la alimentación, seguridad y soberanía alimentaria. Disponible desde Internet en: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/c3e7df6c-89d9-4787-a52d-539a60150baf/content>
- ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA-FAO; FONDO INTERNACIONAL DE DESARROLLO AGRÍCOLA, FIDA; OPS-ORGANIZACIÓN PANAMERICA DE LA SALUD; ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD-OMS; PROGRAMA MUNDIAL DE ALIMENTOS-WFP; FONDO DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA INFANCIA, UNICEF. 2023. América Latina y el Caribe. Panorama regional de la seguridad alimentaria y la nutrición 2023: Estadísticas y tendencias. Santiago. Disponible desde Internet en: <https://openknowledge.fao.org/bitstreams/afb901b8-a419-47d8-a523-b35dc31bed7e/download>
- PÉREZ GARCÉS, R.; SILVA QUIROZ, Y. 2019. Enfoques y factores asociados a la inseguridad alimentaria. *Revista de Salud Pública y Nutrición*. 18(1):15-24. <https://doi.org/10.29105/respyn18.1-3>
- GOBIERNO PROVINCIAL DEL PODER POPULAR. 2022. Estrategia de Desarrollo Provincial Guantánamo 2030. Informe ejecutivo provincia Guantánamo. p.1-40.
- GUASCH, F.; RODRÍGUEZ, L.; VEGA, I.; MORALES, C.; SCHMITZ, M.; MIRÓ, CH.; VIETE, H.; RADA, F.; GONZÁLEZ, M.; NODA, F.; AMARIS, E. 2011. Diagnóstico situacional con fines de gestión de riesgo en las ciudades de Guarenas y Guatire, estado de Miranda, Venezuela. *Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela*. 25(2):5-6.
- HARO MOTA, R.D.; MARCELEÑO FLORES, S. 2019. Enfoque para evaluar vulnerabilidad alimentaria aplicado a los municipios de Nayarit, México Estudios sociales. *Revista de alimentación contemporánea y desarrollo regional*. 29(53):1-23. <https://doi.org/10.24836/es.v29i53.695>
- HERRERAMASO, J.R.; CALERO RICARDO, J.L.; GONZÁLEZ RANGEL, M.Á.; COLLAZO RAMOS, M.I.; TRAVIESO GONZÁLEZ, Y. 2022. El método de consulta a expertos en tres niveles de validación. *Revista Habanera de Ciencias Médicas*. 21(1):1-11.
- HERNÁNDEZ SAMPIERI, R.; FERNÁNDEZ COLLADO, C.; BAPTISTA LUCIO, P. 2003. Metodología de la investigación. Tercera edición. McGraw-Hill Interamericana. México, D.F. 705p.
- HUERTAS LÓPEZ, T.E.; SUÁREZ GARCÍA, E.; SALGADO CRUZ, M.; JADÁN RODRÍGUEZ, L.R.; JIMÉNEZ VALERO, B. 2020. Diseño de un modelo de gestión. Base científica y práctica para su elaboración. *Revista Universidad y Sociedad*. 12(1):165-177.

- OFICINA PROVINCIAL DE ESTADÍSTICA E INFORMACIÓN, ONEI. 2021. Guantánamo. Edición, 2021. Disponible desde Internet en: <https://www.onei.gob.cu>
- PÉREZ RODRÍGUEZ, G. 1996. Los métodos teóricos. Metodología de la investigación educacional. Primera parte. Editorial Pueblo y educación. La Habana, Cuba. 139p.
- PROGRAMA MUNDIAL DE ALIMENTOS, PMA. 2001. Análisis y Cartografía de la vulnerabilidad a la inseguridad alimentaria en Cuba. Proyecto VAM Cuba.
- PROGRAMA MUNDIAL DE ALIMENTOS, PMA. 2020. Plan estratégico provisional para Cuba (2020). 37p.

Estudio de mercado de alevinos en el departamento de Arauca como estrategia de fortalecimiento de la acuicultura

Fingerling market study for the Department of Arauca as a plan to strengthen the aquaculture

Dairo Burgos-Cañas^{1*} ; Andrés Camilo Correa-Nuñez² ; Andrea Carolina Piza-Jerez¹ 

¹Federación Colombiana de Acuicultores, Fedeaqua. Bogotá, D.C., Colombia; e-mail: dairo.burgos@uptc.edu.co; acpizaj@unal.edu.co

²Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, D.C., Colombia; e-mail: accorrea@unal.edu.co

*autor de correspondencia: dairo.burgos@uptc.edu.co

Cómo citar: Burgos-Cañas, D.; Correa-Nuñez, A.C.; Piza-Jerez, A.C. 2024. Estudio de mercado de alevinos en el departamento de Arauca como estrategia de fortalecimiento de la acuicultura. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 27(2):e2726. <http://doi.org/10.31910/rudca.v27.n2.2024.2726>

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 30 de 2024

Aceptado: noviembre 25 de 2024

Editado por: Helber Adrián Arévalo Maldonado

RESUMEN

El sector acuícola ha ganado relevancia en la producción de alimentos a nivel mundial, puesto que el aprovechamiento de las oportunidades y fortalezas de los territorios permite el incremento de la oferta de productos acuícolas, conllevando al aumento del consumo per cápita de pescado. En Colombia, la acuicultura se encuentra en constante crecimiento, favorecida por las condiciones climáticas, topográficas e hidrológicas, aptas para desarrollar la actividad; sin embargo, se evidencia que en regiones, como Arauca, que tienen potencial para la acuicultura, se presentan dificultades que están relacionadas con el manejo técnico y la carencia de una oferta de alevinos en óptimas condiciones para la siembra. Es así como el estudio de mercado de alevinos en Arauca se abordó bajo el enfoque cuantitativo de tipo exploratorio-descriptivo, el cual, permitió la recolección de datos de la oferta y la demanda de alevinos, como también la identificación de los principales departamentos proveedores de alevinos, especies de alevinos comercializadas y actores involucrados en la cadena de comercialización de alevinos. Con base en la información recolectada en campo se realizaron matrices de análisis de factores externos e interno, que permitieron la formulación de plan de acción y estrategias encaminadas a fortalecer el mercadeo de alevinos, en el departamento. La acuicultura en Arauca tiene un gran potencial, pero es necesario aunar esfuerzos entre los diferentes actores de la cadena, que favorezcan el fortalecimiento y la consolidación de esta cadena productiva, en el departamento.

Palabras claves: Cachama; DOFA; Mercadeo de alevinos; Proveedores; Tilapia.

ABSTRACT

The aquaculture sector has gained relevance in food production worldwide since taking advantage of the opportunities and strengths of the territories has increased the supply of aquaculture products, leading to an increase in per capita consumption of fish. In Colombia, aquaculture is constantly growing, favored by the climatic, topographical, and hydrological conditions suitable for developing the activity; however, it is evident that in regions such as Arauca that have the potential for aquaculture, there are difficulties that are related to technical management and the lack of a supply of fingerlings in optimal conditions for planting. Thus, the study of the fingerling market in Arauca was approached under the quantitative exploratory-descriptive approach, which allowed the collection of data on the supply and demand of fingerlings, as well as the identification of the main fingerling supplier departments, commercialized fingerling species and actors involved in the fingerling marketing chain. Based on the information collected in the field, matrices of analysis of external and internal factors were carried out that allowed the formulation of action plans and strategies to strengthen the marketing of fingerlings in the department. Aquaculture in Arauca has great potential; however, it is necessary to join forces between the different actors in the chain to favor the strengthening and consolidating this productive chain in the department.

Keywords: Fingerling marketing; FODA; Suppliers; Tambaqui; Tilapia.

INTRODUCCIÓN

La acuicultura es la tecnología de producción de alimentos con mayor crecimiento en el mundo en las últimas décadas (James *et al.* 2019). En Colombia, la acuicultura representa un sector de gran importancia que aprovecha las condiciones climáticas, topográficas e hidrológicas, aptas para desarrollar la acuicultura y que, a su vez, contribuyen a la mitigación del hambre (León-Sánchez *et al.* 2010). Para la Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca, AUNAP y la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura FAO (2014), el crecimiento desigual del sector genera estructuras empresariales sólidas, algunas con respaldo económico, orientadas a la exportación y, de otro lado, genera pequeñas y medianas empresas (Mypes) piscícolas, dirigidas a abastecer el mercado interno y unidades de producción piscícolas con recursos limitados, que tienen dificultades para participar en procesos de asistencia técnica y limitaciones productivas, pero que contribuyen a mejorar la seguridad alimentaria.

Un factor limitante de la acuicultura es el incremento en los costos de producción, principalmente, de los alimentos concentrados, pero también la incidencia de condiciones climáticas, el costo de los insumos agropecuarios, el comportamiento de los commodities agrícolas en Colombia, los precios del petróleo, los fletes marítimos, el comportamiento del dólar y los costos de los contenedores (FEDEACUA, 2022).

Para el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia (MADR, 2022) y el Departamento Administrativo Nacional de Estadística DANE (2023), la acuicultura en Colombia aumentó en la última década, aportando cerca del 0,3 % al Producto Interno Bruto Nacional; sin embargo, el sector acuícola depende de la oferta de insumos que se relacionan en dos áreas de alta sensibilidad, como lo es el material genético y el suministro de alimento balanceado (Parrado Sanabria, 2012; Luna *et al.* 2023).

En lo que concierne al cultivo de peces se definen tres etapas de gran importancia en la producción: i) reproducción y alevinaje, ii) levante y iii) engorde. Es así como el éxito de la acuicultura depende de los avances en la obtención de una continua y estable producción de alevinos (FAO, 2022; Beach & Viator, 2008), por lo que la disponibilidad, la cantidad y la calidad de alevinos, se consideran factores críticos para el éxito de una producción intensiva y puede llegar a limitar el desarrollo de las etapas posteriores (FAO, 2022; Piza-Jerez, 2024).

A pesar del incremento productivo cercano al 10 % en la última década, el sector acuícola colombiano no ha explorado en su totalidad el potencial productivo y aún se encuentra en crecimiento, buscando incursionar en los mercados nacionales e internacionales y generando alternativas de empleo rural (MADR, 2022; OECD & FAO, 2024).

De acuerdo con el informe de MADR (2023), el sector acuícola para el 2023, reportó una producción 202.956 toneladas de carne de pescado y camarón y la existencia de 17 plantas certificadas con sistema Hazard Analysis and Critical Control Points (HACCP),

avaladas por el INVIMA, para garantizar la inocuidad alimentaria, de forma lógica y objetiva, en acuicultura.

El sector se constituye como una alternativa de empleo rural, generando en el territorio nacional 64.349 empleos directos y 193.047 indirectos, en el 2023. Los departamentos de Huila, Meta, Tolima, Córdoba y Antioquia representan el 41 % de las unidades de producción acuícola (UPAs) y concentran el 67 % de la producción; por su parte, Arauca reporta 874 UPAs, correspondiente al 2 % del total nacional y una participación del 1 % en producción, considerándose baja, de acuerdo con el potencial productivo del departamento (MADR, 2023; Piza-Jerez, 2024).

En el departamento de Arauca, las condiciones climáticas son favorables para el desarrollo de cultivos de alevinos, especies de interés nacional y regional, como lo son cachama (*Piaractus* sp.) y tilapia roja (*Oreochromis* sp.), creando una línea fácil y rápida para producir y satisfacer la demanda que existe en el mercado. A pesar de lo anterior, se evidencia la baja disponibilidad de alevinos de producción local e, incluso regional, así como falta de conocimientos técnicos, la deficiente infraestructura para la comercialización y la transformación de la carne; por el contrario, se observa la utilización de métodos rudimentarios y artesanales, propios de la acuicultura comercial, a pequeña escala (Mahfuzul *et al.* 2025).

El presente estudio busca analizar el mercadeo de alevinos de las principales especies acuícolas que se producen en el departamento de Arauca, como lo son cachama blanca (*Piaractus brachipomus*), cachama negra (*Colossoma macropomum*), tilapia nilótica (*Oreochromis niloticus*), tilapia roja (*Oreochromis* sp.) y otras especies, como bocachico o coporo (*Prochilodus* sp.) y yamú (*Brycon amazonicus*), así como identificar los principales factores que inciden en la oferta y la demanda del material genético.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se abordó a través del enfoque cuantitativo de tipo exploratorio-descriptivo, orientada a la recolección de datos medibles y cuantificables de la oferta y demanda de alevinos, los cuales, se relacionan y se analizan entre sí para generar tendencias y comparación de grupos, permitiendo explorar, cuantificar y describir poblaciones (Cárdenas, 2018; Hernández & Mendoza, 2018); el tipo exploratorio se encarga de proporcionar información general sobre el objeto de estudio (recolección de información) y el descriptivo presenta las características, las funciones y las estrategias del objeto de estudio (Cárdenas, 2018).

De acuerdo con los lineamientos del método deductivo, el estudio se abordó en tres etapas; la primera, analizando la demanda; la segunda, estudiando la oferta y, la tercera, formulando las estrategias con relación a los resultados obtenidos en las etapas anteriores. Como fuentes primarias de información se identificaron los acuicultores del departamento ubicados en los municipios de Arauca, Arauquita, Fortul, Saravena y Tame y los proveedores de alevinos de los departamentos de Arauca y Meta.

Para la recolección de datos se construyeron dos formularios; uno, dirigido a productores acuícolas de los municipios priorizados, con el cual, se buscó conocer las principales tendencias y aspectos relevantes que influyen en la compra de alevinos y, el segundo, orientado a empresas de reproducción, para conocer la oferta, la variedad y la disponibilidad de alevinos; cada formulario fue validado por actores externos, previo a la aplicación. Como fuentes secundarias de información se tomaron los estudios previos a la investigación e informes técnicos y científicos, obtenidos en bases de datos y datos estadísticos de FEDEACUA, AUNAP y Servicio Estadístico Pesquero Colombiano (SEPEC).

La población objeto de estudio correspondió a 111 UPAs del departamento de Arauca, distribuidas en los cinco municipios de intervención del proyecto, así: 34 % de Saravena, 18 % de Arauquita, 17 % de Arauca, 17 % de Tame y 14% de Fortul.

Para la identificación de productores se consultaron las juntas de acción comunal como fuente de información, sobre la ubicación de productores y existencia de asociaciones municipales. De manera paralela, se identificaron acuicultores aledaños y por referencia de los mismos pobladores, se amplió la base de datos de piscicultores de la zona. Se desarrolló un formulario estructurado en cinco componentes: a) datos generales, b) datos productivos, c) proveedores de alevinos, d) trámites y e) fuentes de abastecimiento hídrico. En cuanto a proveedores de alevinos se identificaron cuatro empresas reproductoras de alevinos, con alta injerencia en el departamento de Arauca, a las cuales, se les aplicó formulario diseñado para el levantamiento de información a proveedores, estructurado en tres componentes: a) datos generales, b) datos de producción y c) planta de producción.

La información fue recolectada en los formularios y posteriormente cargada a una base de datos en Microsoft Excel ® para su procesamiento y análisis, mediante estadística descriptiva.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El sector acuícola es representativo para Colombia, generando mayor rentabilidad que las actividades agropecuarias tradicionales, según lo expuesto por el SEPEC (2020), durante la etapa de cría, que incluye, larvas, postlarvas y alevinos; se encuentra que el mayor volumen de producción registrado corresponde al municipio de Restrepo (Meta), con una producción anual mayor a 21.000.000 de individuos.

Lo anterior evidencia que la demanda de alevinos se constituye como el principal factor que determina la producción del sector, ya que el éxito de la acuicultura depende, entre otros, del proceso de la obtención de una continua y estable producción de alevinos que cumplan con parámetros de ganancia, en peso, color, vigor, relación cabeza, lomo y aleta caudal, porcentaje de reversión sexual y resistencia a enfermedades. A continuación, se desarrollan las etapas planteadas para el desarrollo del estudio.

Etapas 1: análisis de demanda. Se determinó que el perfil de los acuicultores está relacionado con la actividad agropecuaria, cuya finalidad es diversificar y mejorar sus fuentes de ingresos económicos. La acuicultura representa la principal actividad del 46 % de los acuicultores encuestados, seguidamente de la agricultura, con 37 % de relevancia; por su parte, el 13 % priorizan la ganadería y el 4 % al comercio y servicios profesionales.

Se encontró que el 62 % presenta alguna condición particular: el 32 % es población víctima; 15 %, mujer cabeza de familia; un 10 %, adulto mayor y un 5 %, en discapacidad.

La presencia de asociaciones en el territorio representa una oportunidad para la formulación de proyectos y planes de acción, que generen crecimiento y desarrollo organizacional. El estudio identificó que el 72 % de los acuicultores no pertenece a ninguna asociación, mientras que el 28 % indicaron estar asociados. En la figura 1, se ilustra la distribución por municipios de la participación en asociaciones acuícolas y la cantidad de productores que participan, destacando el municipio de Fortul, que presentó la mayor cantidad de asociados. Es evidente que la acuicultura debe implementar estrategias de fortalecimiento asociativo, orientadas a impulsar el sector como actividad, que incluye a poblaciones vulnerables y demás actores territoriales, como la mujer y jóvenes rurales.

Las asociaciones acuícolas del departamento concentran sus sistemas productivos en unidades acuícolas colectivas, donde se realizan las labores de mantenimiento de estanques, siembra, levante y ceba. Para facilitar el desarrollo de las actividades, los asociados delegan a un miembro para que realice el proceso administrativo y productivo, razón, por la cual, la herramienta se aplicó a los líderes de las organizaciones, encargados de dicho proceso.

En los últimos años se ha incrementado la actividad acuícola en Arauca y se evidenció, al consultar sobre la trayectoria en la actividad, donde el 64 % de los entrevistados llevan 5 años y son considerados nuevos acuicultores; el 33 % corresponde a productores que se encuentran en proceso de crecimiento y expansión de las unidades acuícolas, con 6 a 12 años de experiencia y el 3 %, llevan entre 14 y 20 años.

La acuicultura ha ganado protagonismo, posicionándose como una de las actividades principales para garantizar la seguridad alimentaria en Arauca. El 7 % de los encuestados realizan la actividad acuícola como estrategia de autoconsumo y el 93 % corresponde a las unidades acuícolas dedicadas a la producción y comercialización de especies, como cachama blanca y negra, tilapia roja y coporo, bagre rayado y yamú.

Los sistemas de producción acuícola se dividen en policultivos y monocultivos; el 59 % de los acuicultores manejan el policultivo, como estrategia para aprovechar el espacio y alimento, empleando las especies en diferentes combinaciones, como cachama y coporo, cachama y tilapia roja o cachama y tilapia nilótica. mientras que el 41 %, se dedica a la producción en monocultivo, es decir, de una

sola especie. Respecto a las especies cultivadas, bien sea en mono o policultivo, la cachama, ya sea blanca o negra, es sembrada por el 92 % de los productores; la tilapia roja es la segunda especie más

reportada, con el 30 % y el bocachico, conocido como coporo en Arauca, ocupa el tercer puesto, siendo sembrado por el 20 %, este último siempre en policultivo.

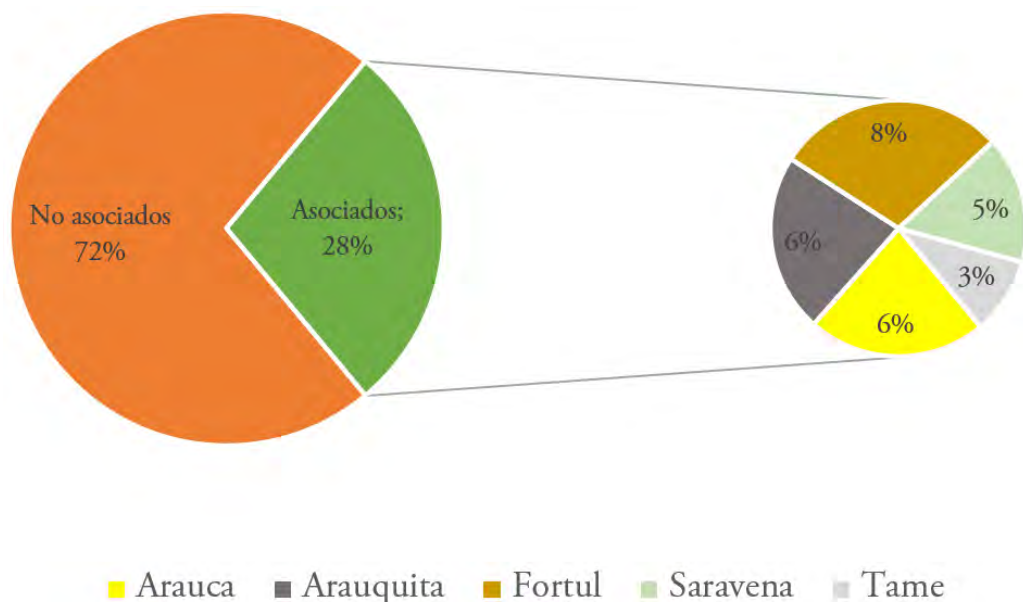


Figura 1. Participación en asociaciones acuícolas en cinco municipios del departamento de Arauca.

El 82 % los productores consideran que la especie acuícola, que mayor utilidad les genera, corresponde a la cachama blanca o negra; este rendimiento es generado por ser una especie nativa que se adapta a las diferentes condiciones ambientales utilizadas en las piscícolas y afluentes presentes en el territorio, así como a la menor frecuencia de enfermedades bacterianas o de origen viral. Por otra parte, el 13 % indicaron obtener mayores rendimientos de la tilapia roja y un 5 % de otras especies, como coporo y tilapia nilótica; sin embargo, los rendimientos de cada una de las especies mencionadas están estrechamente relacionados con la obtención de un alevino en óptimas condiciones para la siembra, el adecuado mantenimiento de los estanques, la calidad del agua en parámetros, como oxígeno disuelto, pH, sólidos disueltos y compuestos nitrogenados.

El manejo técnico de las UPA es clave para lograr un adecuado desarrollo productivo; a pesar de esto, el 60 % de los acuicultores indicaron no tener conocimientos técnicos de acuicultura relacionados con el manejo de plagas y enfermedades, dietas de alimentación e implementación de Buenas Prácticas de Producción Acuícolas (BPPA). Es por esto, por lo que la actividad se desarrolla, de acuerdo con la información y las recomendaciones orientadas por el proveedor de alevinos o actores territoriales, cercanos e involucrados en el sector. Por su parte, el 40 % de los productores mencionan que han fortalecido sus capacidades técnicas, con el objetivo de prevenir y de reducir la contaminación de los productos acuícolas con la visión de satisfacer el mercado que demanda calidad e inocuidad del producto y se representa en un incremento del precio de venta.

Por su lado, la demanda continua y de calidad de alevinos juega un papel fundamental en el desarrollo de la actividad acuícola, puesto que la obtención de una semilla óptima para la siembra determina el éxito de la acuicultura. De acuerdo con la información recolectada en campo, las 111 UPAs visitadas requieren en promedio 1.188.750 de alevinos por año, los cuales, son sembrados en 361 estanques en tierra, que ocupan 192,8 hectáreas de espejo de agua y 10 jaulas flotantes.

La siembra de alevinos con relación al número de estanques se relaciona en la figura 2, donde se ilustra que dos productores tienen entre 15 y 19 estanques cada uno y siembran el 31 % de los alevinos demandados; por otro lado, se encuentran 72 productores que tienen entre 1 y 2 estanques, que representan el 22 % de los alevinos demandados y corresponde, principalmente, a acuicultores de recursos limitados (AREL), que han encontrado en la acuicultura una opción de generación de ingresos, al igual que en países en vía de desarrollo como Bangladesh (Mahfuzul *et al.* 2025).

El 78 % de los acuicultores siembran en 1 a 3 estanques, siendo los sistemas más representativos el extensivo (1 pez por cada 5 – 10m²), realizado en estanques en tierra, con poco o ningún recambio de agua; adicionalmente, se encuentran los sistemas semi-intensivos (2 a 10 peces por m²) e intensivos (10 a 20 peces por m²), que son implementados por 25 productores, que siembran, aproximadamente, el 52 % de los alevinos requeridos.

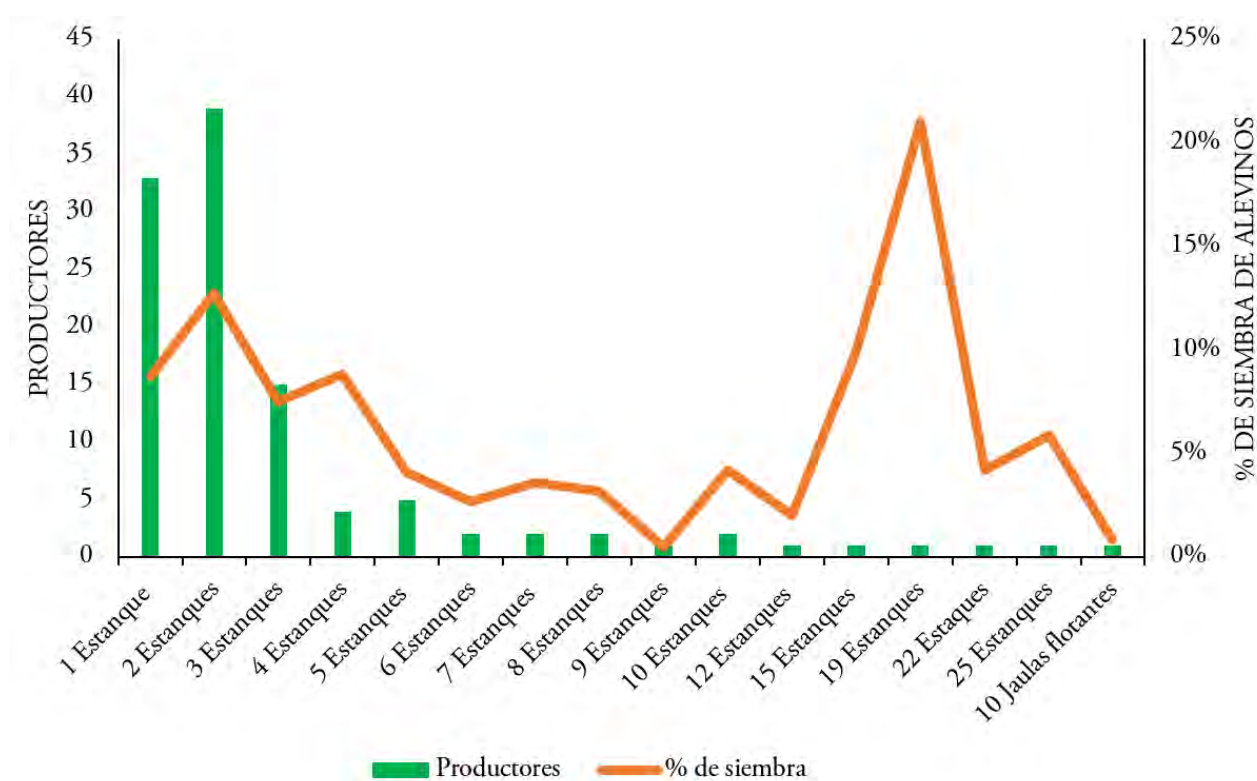


Figura 2. Relación de productores, número de estanques y porcentaje de siembra de alevinos.

Etapla 2: análisis de la oferta. La oferta de alevinos de calidad con características de crecimiento, color, vigor, relación cabeza, lomo y cola y porcentaje de reversión sexual son parámetros determinantes para los acuicultores del departamento; por consiguiente, los aspectos tenidos en cuenta a la hora de comprar alevinos corresponden a: ganancia en peso, resistencia a enfermedades, bajo nivel de mortalidad y compromiso por parte del proveedor, en garantizar que el alevino comercializado cumpla con el criterio de talla, peso, cantidad solicitada y fecha de entrega (Burgos-Morán & Altamirano-Cantos, 2023; Mahfuzul *et al.* 2025).

Los principales proveedores de alevinos del departamento de Arauca se ubican en el municipio de Saravena y ofertan alevinos de cachama, tilapia roja y coporo o bocachico, a precio asequible a los acuicultores, con un tiempo de entrega en promedio de dos días; otros proveedores identificados se encuentran en el departamento del Meta. Asimismo, diferentes puntos de venta de insumos agropecuarios realizan la comercialización de alevinos, cuya procedencia son las empresas productoras de alevinos locales o de otro departamento, como el Meta, el tiempo de entrega de los alevinos está relacionado con la continuidad en la producción y la disponibilidad en la oferta, la ubicación geográfica de la UPA, el transporte y otros factores, como el orden público del departamento y el estado de las vías de acceso.

La oferta continua de alevinos es uno de los factores fundamentales en la producción acuícola, por consiguiente, el estudio priorizó la identificación de empresas de reproducción de alevinos, a través de la información brindada por los acuicultores del departamento, dando como resultado empresas de reproducción, ubicadas en

los departamentos del Meta y Arauca, con una trayectoria entre los 15 a 35 años, produciendo alevinos en estado óptimo para la siembra. En Arauca, se identificaron dos empresas constituidas, ubicadas en el municipio de Saravena, con una trayectoria de 15 a 30 años produciendo y ofertando alevinos de cachama blanca y negra, coporo o bocachico y tilapia roja, para los departamentos de Arauca, Casanare, Meta, Córdoba y Norte de Santander.

Otro departamento que tiene influencia en la oferta de alevinos en Arauca es el Meta, que se caracteriza por ser el primer productor de alevinos de tilapia roja, cachama y bagre, a nivel nacional; en este departamento, se identificaron dos empresas ubicadas en los municipios de Guamal y Cumaral; una, constituida como persona jurídica y, otra como persona natural, las cuales, ofertan una gran cantidad de alevinos para los departamentos de Arauca, Casanare, Meta, Tolima, Santander, Valle del cauca, Guaviare, Cundinamarca y Boyacá. En la figura 3, se ilustran los tres principales departamentos que ofertan alevinos para los acuicultores en Arauca, resaltando la oferta del Meta, ya que solo dos empresas ofertan 46.000.000 de alevinos.

En cuanto a los criterios de comercialización, las empresas productoras y comercializadores de alevinos venden tallas de 2,5 cm por alevinos, con características de crecimiento, adaptabilidad al medio y resistencia a enfermedades. Las empresas de reproducción fueron contactadas vía telefónica, con el fin de presentar el proyecto y concertar una visita para capturar la información necesaria desde la oferta.

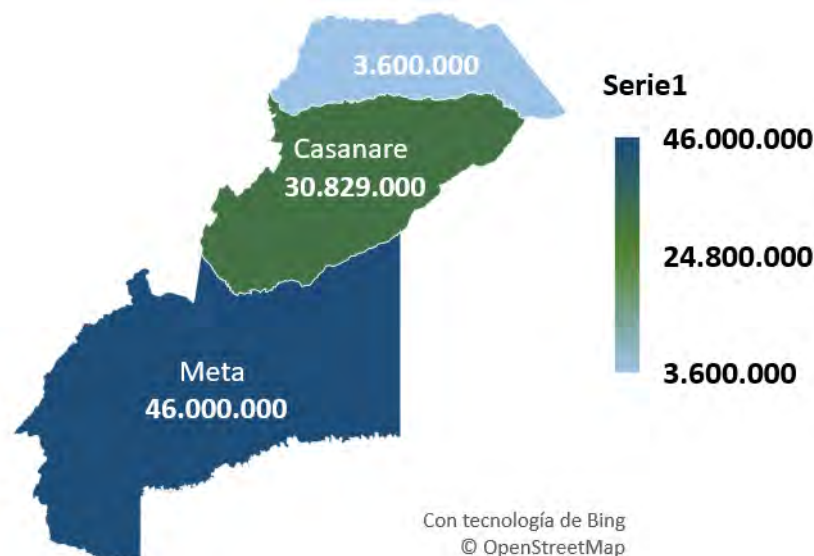


Figura 3. Departamentos que ofertan alevinos para el departamento Arauca.

Las empresas visitadas fueron llamadas empresas 1, 2, 3 y 4, de acuerdo con la información suministrada en la encuesta. La empresa 1 inicia ciclo productivo cada año a partir de abril, ofertando alevinos de cachama y bocachico; la empresa 2 mantiene la continuidad en el proceso productivo durante todo el año, ofertando alevinos de cachama, tilapia roja, tilapia nilótica, carpa, incluso, bagre rayado; la empresa 3 inicia a ofertar alevinos de cachama y tilapia roja desde abril y la empresa 4 mantiene continuidad en la producción de alevinos de cachama y tilapia roja; la particularidad de esta empresa reproductora es que solo oferta alevinos a clientes frecuentes. El precio promedio de cachama oscila entre los \$100 y \$180 pesos por unidad, para alevinos con una talla superior a los 2,5 cm; para tilapia roja, el precio de venta es de \$110 pesos. También, se comercializan otras especies, como el bagre rayado, con un valor por alevino entre los \$3.000 a \$3.800, según parámetros de talla y peso.

Cada empresa asigna el 5 % de compensación de imprevistos o situaciones, que pueden llegar a causar la muerte de los alevinos durante el tiempo que dure el viaje desde la empresa reproductora de alevinos hasta la UPA, ya que, por lo general, el medio de transporte para trasladar los alevinos son empresas de transporte de pasajeros, que no tienen en cuenta parámetros y condiciones adecuadas para el traslado; solo se cuenta con una cantidad de oxígeno en bolsa, por una duración de hasta 25 horas, dependiendo la cantidad y la talla de los peces.

La empresa 4 maneja un límite de despacho de mínimo 100 alevinos, mientras que las demás empresas de reproducción comercializan desde 500 alevinos en adelante; el embalaje por bolsa es de 500 peces; el pago de transporte desde la empresa de reproducción hasta el punto de entrega, acordado con el acuicultor, es de \$12.000 pesos por bolsa. Por su lado, el 100 % de las empresas de reproducción de alevinos visitadas manifestaron emitir concepto sanitario y realizar seguimiento de los alevinos a la hora de ser comercializados, de tal modo, que se garantice la entrega y la calidad de este.

Las empresas de reproducción tienen programas de mejoramiento genético, puesto que los reproductores fueron adquiridos del medio natural y, en algunos de los casos, comprados a otras empresas de reproducción, priorizando fomentar y adquirir características en la progenie, como la obtención de alevinos con mayor profundidad, relación cabeza y cuerpo, color y rendimiento en filete, de tal forma, que los acuicultores e, incluso, el consumidor, queden satisfechos con el producto adquirido.

Las empresas de reproducción de alevinos realizan el proceso de reversión sexual, aplicando alimentos en polvo a base de cereales y proteínas de origen animal, mezclado con hormona, usualmente, 16-alfa-metiltestosterona. El porcentaje de efectividad de revisión sexual por empresas de reproducción varía entre el 95 y 97 %.

Una vez culminado el proceso de reversión sexual, las empresas 1 y 2 vierten el agua residual en lagunas de oxidación; la empresa 3 reutiliza el agua, a través del sistema de recirculación (RAS), permitiendo tener un mayor control sobre los parámetros físicos, químicos y biológicos del agua; por su parte, la empresa 4, la reutiliza, por medio de sistemas de riego para cultivos.

En cuanto a permisos ambientales, las empresas 1, 2 y 3 cuentan con permisos de concesión de aguas superficiales, aguas subterráneas y permiso de vertimiento, otorgado por las Corporaciones Autónomas Regionales; por su lado, la empresa 4 manifestó que los permisos se encuentran en trámite. En cuanto al Instituto Colombiano Agropecuario ICA se evidenció que las empresas de reproducción 1, 2 y 3 cuentan con registros sanitarios y certificado de predio bio-seguro; por su parte la AUNAP ha otorgado los permisos de cultivo a las empresas de reproducción 1 y 3.

De acuerdo con la producción que mantienen las empresas en cada uno de los departamentos mencionados, se difiere que los acuicultores de Arauca cuentan con una amplia oferta de alevinos de cachama, tilapia

roja, siendo las especies más demandadas; por su lado, la producción de bocachico o coporo tiende a ser limitada, pues la comercialización de su carne está asociada con los periodos de subienda del río Arauca.

Los canales efectivos de comunicación son un factor fundamental para las empresas y productores; se identificó que los medios de comunicación que utiliza cada empresa para comercializar sus alevinos corresponden a solicitudes por llamadas telefónicas y redes sociales, como WhatsApp; otro canal de comunicación es el presencial. El proceso de compra del alevino se realiza de tres formas: la primera es directa, donde el productor se dirige a la piscícola, realiza la compra directa y obtiene sus alevinos en el mismo día (esto solo aplica en Arauca); la segunda, incluye a un tercero, llamado intermediario, quien realiza la solicitud de los alevinos por llamada telefónica o vía WhatsApp y espera entre dos a tres días para realizar la respectiva entrega y la tercera es el contacto directo, por llamada o vía WhatsApp del productor y las piscícolas, donde se coordinan fechas de envío y entrega, transporte y medio de pago.

Etapas 3: formulación de estrategias. La información recolectada en campo se soporta en el desarrollo de matrices, como la matriz

de debilidades, oportunidades, fortalezas y amenazas (DOFA) y matriz estratégica, que se centra en identificar y en aprovechar las oportunidades y las fortalezas para contrarrestar las amenazas y eliminar las debilidades de la actividad acuícola; como acciones inmediatas, se construye plan de acción estratégico, que tiene como propósito establecer las estrategias y determinar metas para posicionar el sector acuícola, a nivel local, regional y nacional, que permita diversificar ingresos para las comunidades que desarrollan la actividad (Salgado & Awad, 2022; González & Rodríguez, 2019).

Matriz de debilidades, oportunidades, fortalezas y amenazas (DOFA). El departamento de Arauca cuenta con amplia oferta de recurso hídrico, infraestructura disponible para la acuicultura y con iniciativas de asociaciones, que buscan promover la acuicultura; sin embargo, este sector afronta una serie de dificultades que están relacionadas con la baja asistencia técnica, formalización de la UPA, entre otros, que se relacionan en la Matriz DOFA, que presenta variables que tienen influencia directa en el sector acuícola y que son la base fundamental para la formulación de estrategias enfocadas al aprovechamiento de oportunidades y fortalezas y, a su vez, mitigar el efecto de las Debilidades y Amenazas (Tabla 1).

Tabla 1. Matriz de debilidades, oportunidades, fortalezas y amenazas, matriz DOFA para la acuicultura, en el departamento de Arauca.

No.	Debilidades (D)	No.	Fortalezas (F)
D1	Bajo conocimiento técnico	F1	Existencia de asociaciones organizadas
D2	Precios de venta bajos	F2	Infraestructura disponible para la actividad acuícola
D3	Falta de planta de procesamiento de pescado	F3	Actividad con potencial de expansión en el departamento
D4	Baja articulación institucional	F4	Alternativa de diversidad de ingresos para los productores
D5	Ausencia de predios certificados y permisos requeridos	F5	Economía de autoconsumo
D6	Carencia de equipos tecnológicos actualizados para el desarrollo de la acuicultura	F6	Presencia de entidades de la cadena en el departamento
D7	Baja planificación de la siembra de alevinos	F7	Existencia de oferta de alevinos
D8	Falta de alianzas estratégicas	F8	Accesibilidad a créditos agropecuarios
D9	Canales débiles de comunicación	F9	Estrategias de aprovechamiento del espacio para cultivo acuícola
No.	Oportunidades (O)	No.	Amenazas (A)
O1	Fortalecimiento de I+D en el sector acuícola	A1	Presencia de intermediarios e influencia de otros departamentos
O2	Presencia de instituciones en el territorio	A2	Presencia de depredadores
O3	Alternativas de conservación y protección de afluentes	A3	Sobreoferta de pescado generada por la subienda del río Arauca
O4	Tecnologías de aprovechamiento de materias primas para producción de concentrados	A4	Falta de infraestructura adecuada para la comercialización de alevinos
O5	Incremento del consumo per cápita de pescado	A5	Baja credibilidad en las instituciones del Estado
O6	Mercados potenciales sin explorar	A6	Alto riesgo climático debido a desbordamiento de ríos e inundaciones
O7	Políticas de gobierno favorables en asociatividad	A7	Altos precios de los insumos para desarrollar la actividad acuícola
O8	Políticas públicas orientadas a zonas de conflicto	A8	Deficiente infraestructura de vías terciarias
O9	Actividad que emplea la participación de la mujer	A9	Presencia de grupos armados

Matriz estratégica. La matriz estratégica evalúa, de forma pormenorizada, la situación actual de una organización sobre la base de sus debilidades, fortalezas, oportunidades y amenazas, que ofrece su entorno (Sánchez Huertas, 2020). Las estrategias de tipo FA son las que usan las fortalezas de una empresa para evitar o reducir el impacto de las amenazas externas; tipo DA, que son tácticas defensivas, que tienen como propósito reducir las debilidades internas y evitar las amenazas externas de la organización; tipo DO, que tiene como objetivo mejorar las debilidades internas al aprovechar las oportunidades externas y las estrategia de tipo FO, que es la más fuerte, porque integra las fortalezas y las oportunidades con que cuenta la organización (Ponce Talacón, 2007; Sánchez Huertas, 2020).

Las estrategias le permiten a las asociaciones acuícolas y acuicultores tomar decisiones a corto, mediano y largo plazo. En la tabla 2, se ilustran las estrategias, donde se resalta que la asociatividad es el principal punto de partida para lograr acceder a planes, programas y proyectos de impacto socioeconómicos. Para lograr la conectividad, el sector acuícola debe iniciar por establecer tareas de corto, mediano y largo plazo, con alcances significativos. Asimismo, tanto la acuicultura en Arauca como en Colombia, al igual que en otros países en desarrollo, requieren una atención urgente por parte del gobierno, dada la importancia de esta actividad productiva, dentro de la economía agropecuaria y la socioeconomía colombiana (Partelow *et al.* 2025).

Tabla 2. Matriz estratégica de la acuicultura en el departamento de Arauca.

Estrategia FA	Estrategia DA
- F:1,3,6,8; A:7,5. Fortalecer las estructuras organizativas de las asociaciones a través de programas de acción, fomentando la participación activa en planes de capacitación y sensibilización institucional, proyectos productivos que le permita a la asociación visibilizarse en el territorio, acceder a créditos agropecuarios y disminuir costos de concentrados a través de canales directos de compra. - F:2,4,7,9; A:2,3,6. Planificar las siembras acuícolas que incluyan el adecuado funcionamiento de las instalaciones, prevención de riesgos, proveedor de alevinos en óptimas condiciones para la siembra y canales de efectivos de comercialización. - F1: 3; A1,2. Promover la adecuación de planta de beneficio para las asociaciones a través de proyectos e incentivar la actividad acuícola; establecer convenios directos de comercialización con diferentes empresas distribuidoras productos acuícolas.	- D:1,4,5,7; A3,5,8,9. Crear programas de fortalecimiento técnico y empresarial dirigidos a productores acuícolas, donde se resalte la importancia de acceder y participar en proyectos de investigación y productivos generados por instituciones y entidades como la Agencia de Desarrollo Rural, el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Instituciones Académicas y demás entidades encargadas en promover alternativas que se enfaticen en zonas de conflicto armado. - D:4,5,9; A:5. Desarrollar campañas de sensibilización institucional y protección del medio ambiente a través de diferentes medios de comunicación que incentiven a los productores acuícolas acceder e implementar las normatividades correspondientes - D:2,3,6,8; A:2,3. Crear alianzas estratégicas con actores comerciales para la comercialización la producción donde se garantice la calidad e inocuidad del mismo. - D:8,9; A:8. Gestionar el mejoramiento de la infraestructura vial como factor de desarrollo para la región y facilidad para el transporte de productos agropecuarios.
Estrategia DO	Estrategia FO
- D:2,3,8; O:5,6. Acceder a diferentes mercados nacionales a través de alianzas estratégicas que oferten un producto de calidad y competitivo en precios frente a otros posicionados en el mercado. - D:4,7,9; O:1,2,4 Promover la I+D+i como estrategia de aprovechamiento del potencial acuícola del territorio a través de la implementación de planes y proyectos de investigación que buscan generar alternativas a través del mejoramiento técnico y productivo que permita diversificar ingresos. - D: 7,9; O: 4. Robustecer el uso de tecnologías como factor indispensable de comunicación en tiempo real entre proveedores y productores para el intercambio de saberes que permitan mayor dinámica en el desarrollo de actividades de planeación en siembra de alevinos.	- F: 1,3,6; O: 1,2,4. Fomentar a las asociaciones a crear vínculos directos entre entidades e instituciones que fortalezcan la investigación, el desarrollo, la innovación y la transferencia de conocimientos a través de proyectos y programas que prioricen la extensión agropecuaria, el manejo técnico y productivo de la acuicultura en el departamento. - F: 4, 9; O: 6, 8, 9. Acceder a programas y políticas orientadas a zonas de conflicto, que busquen fomentar el desarrollo, la participación de la mujer y el joven rural como los Programa de Desarrollo con Enfoque Territorial PEDET y proyectos originados por Agencia de Desarrollo Rural ADR que busquen diversificar ingresos y a su vez contribuir con el progreso de los territorios.

Plan de acción estratégico. Establece las estrategias y determinar metas para incentivar la producción acuícola en el departamento de Arauca e incrementar el consumo de pescado y generar aumento en la diversificación de ingresos de cada acuicultor; en la tabla 3, se ilustran las principales estrategias de producto, precio, plazo y promoción, encaminadas a fortalecer la productividad, los estándares de calidad, la formalización de las UPA del departamento, el apoyo en la toma de decisiones, los plazos para adaptarse a los cambios y a las demandas que impone el entorno; de ese modo, la planificación estratégica establece

los aspectos, las metas, el tiempo y los indicadores de medición de cada uno de los propósitos formulados en el plan de acción. Es fundamental que el sector acuícola incluya el plan de acción en las políticas de fortalecimiento de las asociaciones del sector y en los programas de desarrollo agropecuario de cada municipio, a fin de dar cumplimiento a las metas propuestas en el plan de acción. Cabe resaltar que incluir aspectos sociales, económicos, ambientales y de ordenamiento y gobernanza permiten un mejor acercamiento al fortalecimiento de la acuicultura, como actividad productiva (Partelow *et al.* 2025).

Tabla 3. Plan de acción estratégico para la acuicultura en el departamento de Arauca.

	Aspecto	Meta programada	Tiempo	Indicador	Fuente de verificación
Propósito general	Incrementar la actividad acuícola tecnificada y formalizada en el departamento de Arauca mediante planes y programas de acción estratégicos	Posicionar la acuicultura en el departamento de Arauca como una actividad formalizada y complementaria a los sistemas de producción agropecuaria	2 años	Incremento en número de UPA certificadas	Registros y certificaciones
Resultado 1	Establecer programas de capacitación orientados al manejo técnico y productivos de las UPA del departamento	Capacitar para el año 2025 a un 80% de los acuicultores del departamento	2 años	% de incremento en acuicultores capacitados	Listas de asistencia
Actividades	Brindar acompañamiento a las UPA para certificación ante el ICA, AUNAP y Corporinoquia	Certificar al mayor número de UPA	2 años	Incremento en número de UPA certificadas	Registros y certificaciones
	Mejorar logística de transporte en la comercialización de alevinos	Disminución de muerte de alevinos a causa de estrés por traslado	2 años	% de alevinos vivos en granja	Rendimiento de los alevinos en la UPA
	Implementar las BPPA para acceder a mercados no explorados	Certificaciones del mayor número de UPA en BPPA	2 años	Incremento del número de UPA certificadas	Certificaciones por UPA
Resultado 2	Realizar producción acuícola bajo estándares de inocuidad que permitan acceder a nuevos mercados	Ofertar de forma permanente producción con los requerimientos exigidos	2 años	Toneladas ofertadas a nuevos mercados	Número de ventas a nuevos mercados
Actividades	Registrar de forma permanente las entradas y salidas de la UPA para determinar el margen de ganancia	Registrar movimientos financieros	1 año	Número de libros contables adecuadamente diligenciados	Registro o Bitácora
	Estandarizar producción acuícola según los requerimientos del mercado	Establecer canales efectivos de comercialización	1 año	Número de nuevos aliados comerciales	Registro de ventas
	Capacitaciones orientadas al manejo administrativo de la UPA	Fortalecer habilidades de los acuicultores en el manejo de herramientas administrativas	1 año	Número de productores capacitados	Registro de capacitaciones
	Establecer precios de comercialización de acuerdo a las características del producto y costos	Comercializar con precios ajustados al margen de ganancia esperado	1 año	Margen de ganancia	Facturas de venta
Resultado 3	Acceder a mercados locales, regionales y nacionales	Garantizar producción acuícola de calidad y con requerimientos exigidos	1 año	Incremento en toneladas comercializadas	Registro de venta
Actividades	Diseñar campañas de consumo de carne de pescado	Publicaciones en redes sociales sobre la variedad de especies ícticas y benéficos nutritivos de estas	6 meses	Número de publicaciones en redes sociales	Registros de cifras de interacciones de redes sociales
	Establecer puntos de venta en cascos urbanos y ventas a domicilio en lo rural	Establecer sitios y/o espacios de ventas en cada municipio con los requerimientos sanitarios establecidos	1 año	Número de nuevos establecimientos establecidos	Registros sanitarios
	Crear alianzas estratégicas para visibilizar la productividad acuícola del territorio	Involucrar entidades e instituciones en el estudio y desarrollo de planes, programas y proyectos	1 año	Número de acuerdos establecidos	Documentos de alianzas formalizadas

Coo conclusión, en Colombia, la actividad acuícola se encuentra en crecimiento y desarrollo, como es el caso del departamento de Arauca; sin embargo, la falta y la carencia de servicios asociados a la asistencia técnica, programas de capacitación enfocadas en el manejo de BPPA, sensibilización de entidades, juega en contra. Por otra parte, se evidenció que la actividad acuícola ha ganado protagonismo y se posiciona como un sector productivo de importancia en el departamento de Arauca, después de la ganadería y producción agrícola, debido a que ofrece una amplia producción de carne de pescado y, a su vez, emplea mano de obra familiar e inclusión de la mujer, como estrategia de desarrollo económico, como características del enfoque de la nueva ruralidad.

Uno de los factores significativos en la producción acuícola es la oferta de alevinos en óptimas condiciones para la siembra; sin embargo, las condiciones de transporte desde la empresa de reproducción hasta la UPA no son las adecuadas, puesto que el alevino debe soportar cambios bruscos de temperatura, de estrés, por bajos niveles de oxígeno disuelto en bolsas de traslado, que pueden llegar a afectar el desarrollo del alevino en los estanques y, en alguno de los casos, causar la muerte. Existen zonas donde la oferta de alevinos es baja, debido a factores que se relacionan con el estado de la vía, zonas lejanas de cabeceras municipales o centros poblados; por esta razón, se requiere fortalecer aspectos relacionados con las vías de acceso y los canales de comunicación entre productores y empresas de reproducción para acordar y concretar los tiempos de entrega, las condiciones de manejo del alevino y el establecimiento de los estanques.

Para lograr que el sector acuícola del departamento se posicione en el territorio y, a su vez, se expanda hacia otras regiones, se requiere de la aplicación de estrategias encaminadas al fortalecimiento técnico, productivo y empresarial, expuestas en el plan de acción; producto de la interrelación de variables, a fin de contrarrestar los efectos causados por las debilidades y las amenazas, a través del aprovechamiento de las oportunidades y las fortalezas que tiene la actividad acuícola, en esta región del país.

Los productores acuícolas del departamento de Arauca deben generar alianzas con entidades estatales para promover programas y planes de capacitaciones en manejo técnico, Buenas Prácticas de Producción Acuícola, bienestar animal y mercadeo de alevinos, de tal forma, que el sector se posicione y promueva al desarrollo de la región; por su lado, el sector acuícola deberá gestionar los recursos y los proyectos necesarios para incentivar la actividad acuícola en la región, mientras que las entidades deben procurar procedimientos adecuados para la formalización y el acceso a financiamiento del sector, así como implementación de tecnologías, que promuevan la sostenibilidad de la acuicultura.

Agradecimientos. Los autores agradecen al equipo técnico en campo que apoyó el desarrollo de las visitas y las caracterizaciones, así como a los productores y las empresas alevineras que participaron del estudio. **Conflictos de intereses:** El artículo fue redactado y revisado por todos los autores, quienes declaran que no existen conflicto de intereses que pongan en riesgo la validez

de los resultados presentados. **Contribución autores:** Dairo Burgos realizó la curaduría y el análisis formal de los datos, para la escritura del borrador del manuscrito; Andrea Carolina Piza Jerez y Andrés Camilo Correa Nuñez contribuyeron con la planificación de la investigación en campo y manejo de recursos; particularmente, Andrea Carolina Piza Jerez, lideró la contextualización y la metodología del manuscrito. Todos los autores participaron en la redacción, la revisión, la edición del manuscrito y la versión final. **Financiación:** Este estudio fue financiado con recursos del sistema general de regalías -SGR-, a través del proyecto “Fortalecimiento de las capacidades en I+D que contribuyan a la solución de problemáticas priorizadas en la cadena acuícola del departamento de Arauca”, código BPIN 2020000100465.

REFERENCIAS

- AUTORIDAD NACIONAL DE ACUICULTURA Y PESCA, AUNAP; ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACIÓN, FAO. 2014. Plan nacional para el desarrollo de la acuicultura sostenible en Colombia. Disponible desde Internet en: <https://fedecua.org/files/plan-nacional-para-el-desarrollo-de-la-acuicultura-sostenible-colombia.pdf>
- BEACH, R.; VIATOR, C.L. 2008. The economics of aquaculture insurance: an overview of the U.S. pilot insurance program for cultivated clams. *Aquaculture Economics & Management*. 12(1):25-30. <https://doi.org/10.1080/13657300801959613>
- BURGOS-MORÁN, R.; ALTAMIRANO-CANTOS, C. 2023. Caracterización de la piscicultura amazónica ecuatoriana, un panorama de su desarrollo y perspectivas. *Rev. AquaTechnica*. 5(3):182-206. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10443502>
- CÁRDENAS, J. 2018. Manual de curso. Investigación cuantitativa. Programa de Posgrado en Desarrollo Sostenible y Desigualdades Sociales en la Región Andina. trAndeS. Berlín. 64p. <http://dx.doi.org/10.17169/refubium-216>
- DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO NACIONAL DE ESTADÍSTICA, DANE. 2023. Boletín técnico. Producto Interno Bruto (PIB) III Trimestre 2023. Disponible desde Internet en: Preliminar. <https://www.dane.gov.co/files/operaciones/PIB/bol-PIB-IIItrim2023.pdf>
- FEDERACIÓN COLOMBIANA DE ACUICULTORES, FEDEACUA. 2022. Por qué está caro el alimento balanceado. *Revista ACUICULTORES*. 6:8-13.
- GONZÁLEZ, J.; RODRÍGUEZ, M. 2019. Manual práctico de planeación estratégica. Ed. Días de Santos. España. 129 p.
- HERNÁNDEZ, R.; MENDOZA, C. 2018. La ruta de la investigación cuantitativa. En: Hernández, R.; Mendoza,

- C. Metodología de la investigación: las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta. Ed. McGraw Hill Interamericana Editores, S.A. de C. V. Mexico. p.39-66.
- JAMES, A.; FRANK A.; TARYN, G. 2019. Economics of aquaculture policy and regulation. *Annual Review of Resource Economics*. 11:101-113. <https://doi.org/10.1146/annurev-resource-100518-093750>
- LEÓN-SÁNCHEZ, R.; VILLANUEVA-CUEVAS, G.; GONZÁLEZ-LEDESMA, I.; GARCÍA-LÓPEZ, P.M.; RUIZ-LÓPEZ, M.A.; GARCÍA-CHAVEZ, A.A. 2010. Evaluación de subproductos agropecuarios en nutrición de tilapias *Oreochromis spp* (PISCES CICHLIDAE). *AquaTIC*. 32:1-6. http://revistaaquatic.com/aquatic/pdf/32_01.pdf
- LUNA, M.; LLORENTE, I.; LUNA, L. 2023. A conceptual framework for risk management in aquaculture. *Marine Policy*. 147:105377. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2022.105377>
- MAHFUZUL, H.; AKHTARUZZAMAN, K.; MOHAMMAD, M.; EMDAD, H.; NAHIDUZZAMAN, M.; SAYEMUL, I. 2025. Improved aquaculture management practices and its impact on small-scale rural aquaculture farmers in Bangladesh. *Aquaculture* 594:741459. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2024.741459>
- MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL, MADR. 2022. Acuicultura en Colombia - Cadena de la acuicultura. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. Disponible desde Internet en: <https://sioc.minagricultura.gov.co/Acuicultura/Documentos/2021-06-30%20Cifras%20Sectoriales.pdf>
- MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL, MADR. 2023. Cadena de la acuicultura: dirección de cadenas pecuarias, pesqueras y acuícolas. Disponible desde Internet en: <https://www.minagricultura.gov.co/ministerio/direcciones/Paginas/Direccion-de-Cadenas-Pecuarias.aspx>
- ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA, FAO. 2022. The State of World Fisheries and Aquaculture 2020. FAO. París, Roma. 244p. <https://doi.org/10.4060/ca9229en>
- ORGANIZACIÓN PARA LA COOPERACIÓN Y EL DESARROLLO ECONÓMICO, OECD; ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA, FAO. 2024. Perspectivas agrícolas OCDE-FAO 2024-2033. Publicaciones de la OCDE. París, Roma. 4p. Disponible desde Internet en: <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/cd1463es>
- PARRADO SANABRIA, Y. 2012. Historia de la acuicultura en Colombia. *AquaTIC*. 37:60-77.
- PARTELOW, S.; NAGEL, B.; GENTRY, R.; GEPHART, J.; ROCHA, J. 2025. Archetypes of aquaculture development across 150 countries. *Aquaculture*. 595:741484. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2024.741484>
- PIZA-JEREZ, A.C. 2024. Aquaculture in Colombia: Current Affairs in 2024. *World Aquaculture Society*. 55(2):55.
- PONCE TALACÓN, H. 2007. La matriz FODA: alternativa de diagnóstico y determinación de estrategias de intervención en diversas organizaciones. *Enseñanza e Investigación en Psicología*. 12(1):113-130.
- SALGADO, D.; AWAD, G. 2022. Metodología para el análisis estratégico cuantitativo en proyectos a partir del análisis de riesgos. *Estudios Gerenciales*. 38(165):424-435. <https://doi.org/10.18046/j.estger.2022.165.5198>
- SÁNCHEZ HUERTAS, D. 2020. Análisis FODA o DAFO. Ed. Bubok publishing S.L, España. 206p.
- SERVICIO ESTADÍSTICO PESQUERO COLOMBIANO, SEPEC. 2020. Análisis de la producción de la acuicultura durante el año 2019 en el área de cobertura de la encuesta estructural desarrollada durante el año 2020. Disponible desde Internet en: http://sepec.aunap.gov.co/Archivos/Boletines-2020/SEPEC_Boletin_Produccion_Acuicultura_2020.pdf

Etnobotánica de las cactáceas andinas de Boyacá-Colombia: contribución a su conservación y saberes tradicionales

Ethnobotany of Andean cacti of Boyacá-Colombia: contribution to their conservation and traditional knowledge

Daniela Porras-Flórez^{1,2} ; Sofía Albesiano^{3*} ; Kendry Hernández-Herrera⁴ ; Nubia Gómez-Velasco⁵ 

¹Fundación Cataruben. Yopal - Casanare, Colombia.

²Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, UPTC. Grupo de Estudios en Genética y Biología Molecular - Gebimol. Tunja - Boyacá, Colombia; e-mail: dani95danca@gmail.com

³Universidad del Tolima. Facultad de Ciencias, Departamento de Biología. Ibagué - Tolima, Colombia; e-mail: asalbesianoh@ut.edu.co

⁴Universidad de La Guajira. Grupo de Estudio en Biotecnología. Riohacha - Guajira, Colombia; e-mail: kphernandez@uniguajira.edu.co

⁵Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, UPTC. Tunja - Boyacá, Colombia; e-mail: nubia.gomez@uptc.edu.co

*autor de correspondencia: asalbesianoh@ut.edu.co

Cómo citar: Porras-Flórez, D.; Albesiano, S.; Hernández-Herrera, K.; Gómez-Velasco, N. 2024. Etnobotánica de las cactáceas andinas de Boyacá-Colombia: contribución a su conservación y saberes tradicionales. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 27(2):e2712. <http://doi.org/10.31910/rudca.v27.n2.2024.2712>

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 23 de 2024

Aceptado: noviembre 26 de 2024

Editado por: Helber Adrián Arévalo Maldonado

RESUMEN

En Colombia son limitados los usos alimenticios, medicinales y ornamentales que se le dan a las cactáceas en comparación con otros países latinoamericanos y podrían llegar a constituir un potencial recurso agronómico y económico en los ecosistemas semiáridos andinos, entre los 500-2.800 m s.n.m. El presente trabajo tuvo como propósito determinar los factores socioeconómicos que inciden en el conocimiento y el aprovechamiento de los taxones de cactáceas, a fin de establecer las actividades antrópicas, que ponen en riesgo la conservación de las especies y los saberes ancestrales. Para ello, se aplicaron 262 encuestas semiestructuradas, con preguntas, como nombre, edad, género, nivel educativo, fuente de empleo, entre otras; se establecieron ocho categorías de uso: agrícola, agroecológico, alimentario, comercial, medicinal, ornamental, servicio ambiental y tecnológico; se calcularon tres índices: importancia relativa, valor de uso para cada una de las especies y riqueza de conocimientos de los participantes. Se reportan nueve especies, de las cuales, ocho se utilizan como alimento y una especie, como ornamental, destacándose *Opuntia ficus-indica*, por su diversidad de usos, mientras que *Cylindropuntia tunicata*, no reporta importancia. Variables, como la edad y el tiempo de residencia, mostraron una relación significativa con el número de plantas utilizadas por los participantes. Se espera que los resultados contribuyan a difundir y conservar el conocimiento local, a la preservación de la flora cactológica y promover su cultivo a gran escala, ya que especies, como *Mammillaria columbiana*, *Melocactus andinus* y *Melocactus curvispinus*, están siendo utilizadas de manera insostenible, lo que podría provocar su extinción local.

Palabras clave: Cactaceae; Conservación; Diversidad biocultural; Índice de riqueza de conocimiento; Índice de importancia relativa.

ABSTRACT

In Colombia, the use of cacti for food, medicinal, and ornamental purposes is limited compared to other Latin American countries. However, they can potentially become valuable agronomic and economic resources in the semi-arid Andean ecosystems, between 500 and 2800 m a.s.l. The purpose of this study is to establish the relationship between the socioeconomic factors of the interviewers and their knowledge and use of the taxa, as well as to analyze anthropogenic activities that endanger the conservation of their populations and ancestral knowledge. To achieve this, 262 semi-structured surveys were conducted with questions like name, age, gender, educational level, and employment status, among others. Eight categories of use were identified: agricultural, agroecological, food-related, commercial, medicinal, ornamental, environmental, and technological services. Three indices were calculated: relative importance, use value for each species, and the wealth of knowledge of the participants. Nine species were reported, eight used for food and one as an ornamental species, with *Opuntia ficus-indica* standing out for its diverse range of applications, while *Cylindropuntia tunicata* is considered insignificant. Variables such as age and length of residence showed a significant correlation with the number of plants used by the participants. The results are expected to contribute to the dissemination of local knowledge, the preservation of cacti flora, and the promotion of large-scale cultivation. This is particularly crucial given that species such as *Mammillaria columbiana*, *Melocactus andinus*, and *Melocactus curvispinus* are currently being utilized in an unsustainable way, which could cause its local extinction.

Keywords: Cactaceae; Conservation; Biocultural diversity; Knowledge richness index; Relative importance index.

INTRODUCCIÓN

Las especies de la familia Cactaceae se identifican por presentar diversas formas de crecimiento, barril, cilíndricas, columnares, globosas, globosas-deprimidas (Vázquez-Sánchez *et al.* 2012), además de tallos verdes fotosintéticos, en cuya epidermis y clorénquima abundan los cloroplastos, debido a la ausencia o duración fugaz de las hojas, excepto en el género *Pereskia*, donde son persistentes, pero en periodos de intensa sequía, se caen y son remplazadas por espinas. También, los tallos son carnosos, con tejidos que almacenan hidrocoloides, lo cual, les permite tolerar el déficit hídrico prolongado, que se presenta en las regiones áridas y semiáridas bajas, menores de 1.500 m s.n.m. y altas, 2.800 m s.n.m. (Porras-Flórez *et al.* 2017), ubicadas en la cordillera de los Andes. La presencia de braquiblastos que crecen hacia el interior de las areolas permite el desarrollo de ramas, espinas y flores. La familia está representada por 128–200 géneros y 1.500–2.000 especies, nativas del continente americano (Kiesling & Ferrari, 2005).

En Colombia, el uso de las cactáceas es relativamente menor en comparación con otros países latinoamericanos (Marques de Lucena *et al.* 2013; Lucena *et al.* 2015; Huaylla *et al.* 2014; Ostolaza-Nano, 2014; Pedrosa *et al.* 2020). En México, sobresalen las cactáceas por su diversidad, en la flora de las regiones áridas y semiáridas (Arias & Véliz, 2006; Casas *et al.* 2006).

A la fecha, solo las especies *Acanthocereus pentagonus*, *Austrocylindropuntia subulata*, *Hylocereus undatus*, *Melocactus coccineus*, *Melocactus curvispinus*, *Opuntia dillenii*, *Opuntia ficus-indica*, *Opuntia schumannii*, *Pereskia bleo* y *Stenocereus griseus* son empleadas en Colombia, con fines alimenticios y medicinales, principalmente, utilizando sus hojas, frutos y tallos; a nivel tecnológico, se diseñó una metodología para la extracción y el secado del hidrocoloide de *A. subulata*, *O. dillenii* y *O. ficus-indica* y su uso como sustituto de la pectina, al actuar como gelificante en la elaboración de un bocadillo tipo barra de cereal, enriquecida con cereales y frutas de importancia para el departamento de Boyacá, generando una oportunidad agroindustrial (Arrieta-Violet *et al.* 2022).

De particular interés resultan las investigaciones en diferentes países latinoamericanos, que dan cuenta de la heterogeneidad dentro de una comunidad humana en el volumen del conocimiento etnobotánico, ya que este se ve influenciado por factores socioeconómicos sobre la utilización y el conocimiento (García-Barriga, 1992; Figueroa-C. & Galeano, 2007; Villalobos *et al.* 2007; Castellanos Camacho, 2011).

En el caso de *O. ficus-indica*, su cultivo no solo se encuentra en América, sino en África, Australia, Europa y Medio Oriente (Pochettino, 2015; Ochoa & Barbera, 2018). Aunque en Colombia existen asociaciones de productores de *O. ficus-indica* y se cultiva *Hylocereus megalanthus* (pitahaya amarilla), aún falta explorar los usos y las tradiciones de estas especies en los enclaves semiáridos andinos, donde son un elemento predominante en el paisaje, no solo por el número de individuos sino por el porte de algunas de ellas, que llegan a medir más de 3 m de alto (Albesiano & Rangel-Churio, 2006).

En los departamentos de Antioquia, Boyacá, Guajira, Huila y Santander, se reportan proyectos productivos de *O. ficus-indica* y de otras especies ornamentales, que contribuyen a la economía de muchos habitantes de zonas áridas y semiáridas, ofreciéndoles nuevas oportunidades, en un mercado que se está impulsando, a nivel nacional, pero que no ha recibido atención por parte de inversionistas para impulsar estudios tecnológicos y de asesoría técnica, en productos a base de cactáceas. Sería beneficioso ampliar su aprovechamiento agronómico en estas áreas, con miras a convertirlas en un recurso económico, para las comunidades rurales andinas.

Los ecosistemas áridos y semiáridos andinos presentan cambios en su cobertura vegetal por procesos erosivos y acciones antrópicas, principalmente, al sobrepastoreo extensivo e incontrolado de ganado caprino, que consumen los ápices de los tallos jóvenes de boragináceas, cactáceas, verbenáceas, entre otros y, en menor proporción, a la sustitución por cultivos, a la extracción de leña, al retiro de su hábitat de individuos de *Austrocylindropuntia*, *Mammillaria* y *Melocactus*, con fines comerciales y a la construcción de obras civiles, como vías de comunicación y viviendas. Las cactáceas constituyen un elemento importante en estos ecosistemas y es necesario preservarlas porque juegan un papel considerable, al mitigar el aumento de la desertificación, a causa del cambio climático (Albesiano & Rangel-Churio, 2006).

El presente trabajo tuvo como propósito asignar a las especies de Cactaceae las categorías de uso, identificar las especies más empleadas, relacionar los factores socioeconómicos de los informantes con el conocimiento de cada una de ellas y registrar los factores antropogénicos, que afectan la conservación de las poblaciones de cactus.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio: se realizaron salidas de campo a las veredas semiáridas de los municipios de Cucaita: Centro, Cuesta en Medio y Llano (5°31'55"N y 73°27'44"W; 2650 m s.n.m.); Ráquira: Candelaria Occidente, Candelaria Oriente, Carapacho (5°31'12.22"N y 73°36'20.92"W; 2165 m s.n.m.) y Villa de Leyva: Cañuela, Llano Blanco, Monquirá, Ritoque, Sabana y Sopotá (5°36'16.19"N y 73°31'34.92"W; 2149 m s.n.m.), en el departamento de Boyacá. El material recolectado se depositó en el herbario UPTC. Estas áreas fueron seleccionadas debido a su rica biodiversidad y a la notable presencia de cactáceas adaptadas a condiciones de aridez (Figura 1).

Identificación taxonómica: se llevó a cabo utilizando tratamientos taxonómicos previos (Porras-Flórez *et al.* 2017; Porras-Flórez *et al.* 2020), trabajos específicos de la región (Castellanos Camacho, 2011; González, 2014) y la consulta de los exsiccata de los herbarios COL (<http://www.biovirtual.unal.edu.co/es/colecciones/search/plants/>) y UPTC. Se elaboró un catálogo fotográfico, que incluye las especies de cactáceas presentes en cada municipio, con el objetivo de facilitar el reconocimiento de los taxones, por parte de los informantes.

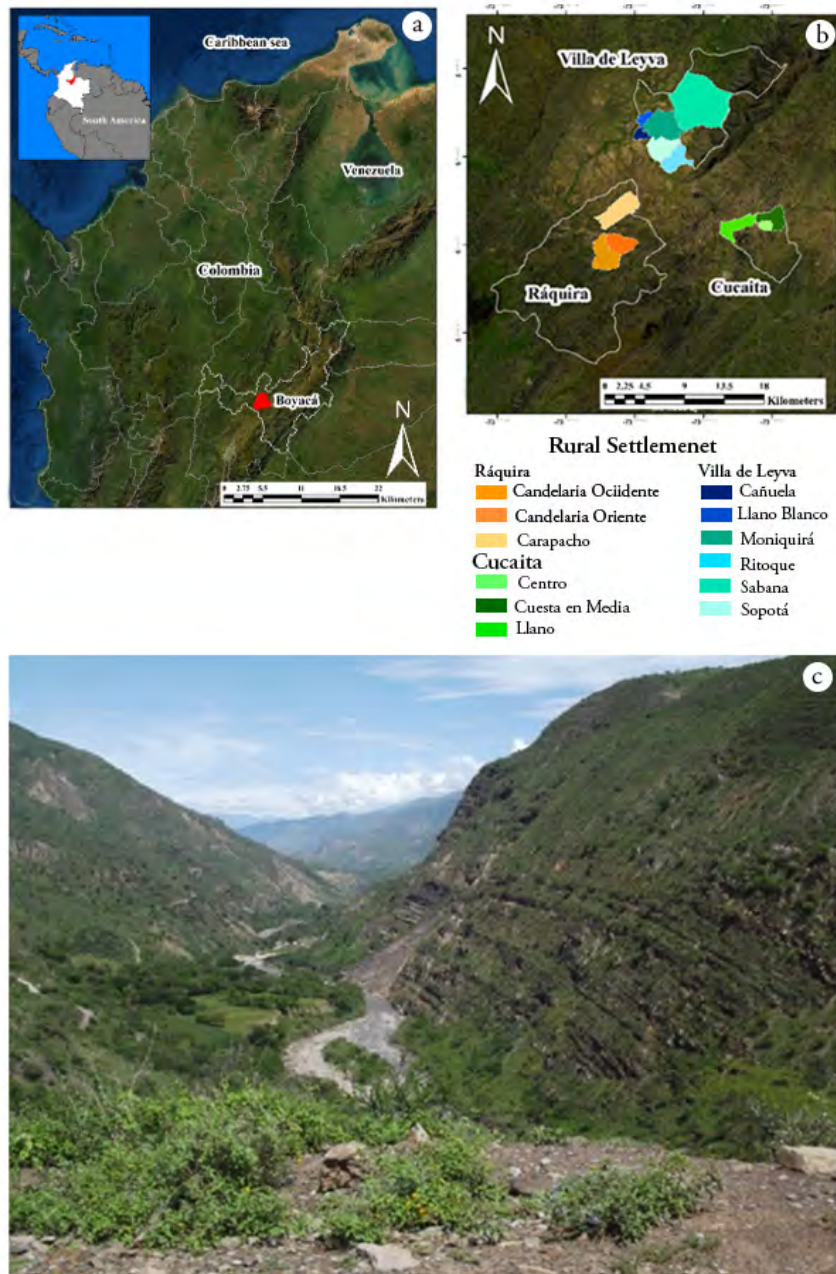


Figura 1. Área de estudio. a) Municipios ubicados en los enclaves semiáridos interandinos de la cordillera Oriental; b) Veredas muestreadas en cada municipio del departamento de Boyacá; c) Ambiente de altura. Fotografía de: Sofía Albesiano.

Aspectos éticos: este estudio fue aprobado por el Comité de Ética para la Investigación Científica de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, asegurando el cumplimiento de los estándares éticos y legales en la recolección de datos y la interacción con los participantes, quienes firmaron voluntariamente su consentimiento informado, lo que permite la publicación de la información etnobotánica.

Estimación del tamaño de la muestra (n): el número de habitantes por vereda (N) se calculó a partir del número de habitantes rurales mayores de 18 años, registrados en cada municipio y la densidad poblacional, según el Departamento Nacional de Planeación (DNP, 2019). Se aplicó la fórmula propuesta por Badii *et al.*

(2008), para determinar un tamaño muestral (n), estadísticamente representativa, de personas a encuestar por municipio. Dado la ausencia de un marco muestral completo, se utilizó un muestreo no probabilístico por cercanía y por cuotas (Lastra, 2000), seleccionando a los participantes que residían en el área de estudio.

Estructura y aplicación de la encuesta: se implementó una encuesta a 262 personas, dividida en dos grupos de preguntas: el primero, relacionado con datos personales, como nombre, edad, género, nivel educativo, ocupación y tiempo de residencia en la zona; el segundo, indagaba sobre etnobotánica de la planta, incluyendo el nombre común o vernáculo de cada especie, sus usos, la forma de empleo y la estructura de la planta utilizada. A cada participante se

le asignó un código de identificación y se realizó una depuración y normalización de los datos para conformar la base de datos. Los resultados de la encuesta se agruparon, según las categorías propuestas por Estupiñán-González & Jiménez-Escobar (2010).

Además de las 262 encuestas, se efectuaron entrevistas adicionales, con aquellos participantes que mostraron disponibilidad y consentimiento para ello. Este enfoque mixto permitió enriquecer y profundizar en la información recogida, especialmente, en aspectos donde las respuestas obtenidas, mediante el cuestionario inicial, eran insuficientes o requerían mayor claridad. A partir de este enfoque mixto, se logró explorar, con mayor detalle, los usos específicos, las técnicas de manejo y las percepciones culturales, relacionadas con las cactáceas, lo cual, fortaleció la calidad y profundidad de los datos etnobotánicos recolectados. Este método de triangulación de datos ayudó a validar la información recogida y a obtener una comprensión más completa y matizada de las interacciones humanas con estas especies.

Índices etnobotánicos: el índice de riqueza de conocimiento individual (RQZi) representa el conocimiento que posee el encuestado sobre una o más especies en comparación con todas las registradas en cada municipio; este índice varía entre 0,0 y 1,0, siendo este último indicativo de un conocimiento más extenso de los taxones (Castellanos Camacho, 2011). El índice de valor de uso (UVs) evalúa la importancia sociocultural de una especie para el informante. El índice de importancia relativa (IR) refleja la utilidad de la planta en función de la diversidad de sus usos; el valor máximo que se puede asignar a una especie es 2,0 (Da Silva *et al.* 2014).

Relación de datos etnobotánicos y factores socioeconómicos: se realizó un análisis correlacional descriptivo para examinar la relación entre datos etnobotánicos y factores socioeconómicos. Tras normalizar, depurar y codificar los datos, se realizaron análisis exploratorios, incluyendo el uso de diagramas de Box Plot, para detectar potenciales datos atípicos. Se emplearon técnicas de análisis univariadas y bivariadas para evaluar la cantidad de plantas utilizadas por municipio, partes de la planta empleadas, categorías de uso e índice de riqueza de conocimiento. Estas variables se cruzaron con los datos del municipio, género, ocupación y rango de edad del participante, para explorar posibles asociaciones.

La relación entre variables categóricas cualitativas, como el municipio, el género y la ocupación y cuantitativas, se analizó mediante la prueba chi-cuadrado de independencia. Para variables cuantitativas, se calculó el coeficiente de correlación de Pearson (R_{xy}), asegurando primero que se cumplieran los supuestos necesarios, incluida la normalidad. Para verificar la hipótesis de no asociación entre las variables, se determinaron los niveles de significancia: $\alpha=10\%$ (*), $\alpha=5\%$ (**), y $\alpha=1\%$ (***)

Conservación: durante la encuesta se documentaron las observaciones de los participantes sobre la disminución de las poblaciones de las especies de cactáceas, atribuidas a actividades humanas o desastres naturales y se complementaron con estudios locales (González, 2014), para identificar posibles factores de riesgo. Con base en las exploraciones de campo y la consulta de los exsiccata de los herbarios

COL (<http://www.biovirtual.unal.edu.co/es/coleccion/search/plants/>) y UPTC, se calculó la Extensión de Ocurrencia (EOO), utilizando el software GeoCAT (Bachman & Moat, 2012), basándose en los criterios de la Lista Roja de la IUCN (2024).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Usos atribuidos a las cactáceas: se mencionan ocho categorías de uso junto con las nueve especies registradas para la zona de estudio (Tabla 1). La categoría como fuente de alimento es la más citada, seguida de ornamental y medicinal (661, 251, 138 citaciones, respectivamente). *Opuntia ficus-indica* se destaca por ser la más utilizada como alimento, especialmente, los frutos, entre el 68 y el 87 % (230 menciones), lo cual, coincide con lo registrado por los pobladores del norte de Córdoba, Argentina, para la preparación de arrope (Luján Ahumada & Trillo, 2017). Además, hay cuatro cultivos para la producción de cladodios y frutos (Figuras 2b, 2d), operados por propietarios de otros departamentos, indicando que el valor de este cultivo es reconocido, principalmente, por personas externas a la región. Los usos agroecológicos, agropecuarios, medicinales y nutricionales de *Opuntia ficus-indica* coinciden con informes de otros países, como Australia, Brasil, Italia, México y Sudáfrica (Casas *et al.* 2006; Louhaichi *et al.* 2018; Ochoa & Barbera, 2018).

Entre el 12 y el 25 % de los pobladores usan *Austrocyllindropuntia cylindrica* (Figura 3a) y *Austrocyllindropuntia subulata* (Figura 3b), para fines ornamentales, mientras que entre el 3,0 y el 6,0 % las emplean como cerca viva. Además, la mayoría de los encuestados encuentran difícil distinguirlas entre sí, debido a su alta similitud morfológica.

Los usos de *A. cylindrica* y *A. subulata* como cercas vivas son comunes en países andinos del norte de Suramérica, Colombia, Ecuador y Perú, pero se registran usos por parte de comunidades indígenas en el Perú, donde se empleaban las espinas como agujas y para fabricar peines (Ostolaza-Nano, 2014).

Mammillaria columbiana (Figura 3d) es conocida, tanto en México como en Colombia, por el color llamativo y el dulzor de sus frutos y fue mencionada por el 53 % de los encuestados; también, se documentó su uso ornamental, lo que implica la extracción de algunos ejemplares de su hábitat natural (Bravo-Hollis & Sánchez-Mejorada, 1991).

Los informantes no distinguen fácilmente entre *Melocactus andinus* (Figura 3g) y *Melocactus curvispinus* (Figura 3h), debido a su gran similitud morfológica y reportan usos similares para ambos taxones. En Ráquira, el 34 % de los encuestados utiliza principalmente estas especies como ornamentales o, en ocasiones, las comercializa localmente.

Los pobladores de Boyacá y de Santander le dan las mismas aplicaciones a *M. andinus* y *M. curvispinus* y en La Guajira, los indígenas Wayuú amplían el uso alimenticio de *M. curvispinus*, al consumir los frutos, utilizar el mucílago como fuente de agua, elaborar almíbar y preparar arepas con su base (López-Camacho *et al.* 2016).

Según la comunidad, *O. ficus-indica* (Figura 3g) es similar a *Opuntia soederstromiana* (Figura 3i), pero esta última presenta más espinas y sus

frutos son más dulces y pequeños, con propiedades y usos similares. El 64 % de las personas consumen ocasionalmente los frutos y un 4,0 %, la utiliza como cerca viva (Figura 2c). El 43 % de las personas ingieren esporádicamente los frutos de *Opuntia quitensis* (Figura 3h), aunque su manipulación es complicada, debido a la abundancia de gloquidios. Esta especie, frecuentemente, es confundida con *O. soederstromiana*.

En Ecuador, los frutos de *O. quitensis* y *O. soederstromiana* son consumidos y, a esta última, se le atribuyen propiedades estéticas y medicinales; las raíces las emplean para tratar dolencias estomacales y el

mucílago de los cladodios, para controlar la fiebre, como expectorante y para eliminar manchas en la piel (Anderson, 2001).

Datos etnobotánicos y factores socioeconómicos: se llevaron a cabo tres correlaciones a nivel local. La primera, consideró el número de plantas utilizadas con relación a variables, como la edad, género, nivel educativo, ocupación y tiempo de residencia en la zona (Tablas 2 y 3). La segunda, correlacionó estas plantas con categorías de uso y la tercera, con el índice de riqueza de conocimiento.

Tabla 1. Usos y categorías de las cactáceas. Agricultura (Agt), Agroecológico (Agr), Comercial (Co), Servicio Ambiental (SAm), Alimenticio (Al), Medicinal (Med), Ornamental (Or), Tecnológico (Tec). Parte usada: Planta Completa (PC), Flor (FL), Fruto (FR) y Tallo (T). Los participantes no reportaron usos para *Cylindropuntia tunicata*.

Especie	Nombre vernáculo	Usos
Subfamilia Cactoideae		
<i>Mammillaria columbiana</i>	ajicitos, cauto, piña	Al: Consumo, in natura (FR). Co:Macetas (PC). Or: Macetas (PC)
<i>Melocactus andinus</i>	ajicitos, cauto	Al: Consumo, in natura (FR). Or: Macetas (CP)
<i>Melocactus curvispinus</i>	ajicitos, cauto	Al: Consumo, in natura (FR). Or: Macetas (PC)
<i>Austrocylindropuntia cylindrica</i>	penco, cactus cacho de buey	Agr: Cerca viva (PC). Me: Tratar la tos, pétalos en infusión (FL). Or: Macetas (PC). Tec: Purificación del agua, el mucílago se hierve con agua (T)
Subfamilia Opuntioideae		
<i>Austrocylindropuntia subulata</i>	penco, cactus cacho de buey	Agr: Cerca viva (PC). Med: Tratar la tos, pétalos en infusión (FL). Or: Macetas (PC)
<i>Cylindropuntia tunicata</i>	vainilla	-
<i>Opuntia ficus-indica</i>	higo, higo de castilla	Agt: Tratar la indigestión del ganado, cladodios licuados (T); forraje, in natura (T). Agr: Cerca viva (PC); compostaje, tallos con lima dolomita o lombrices (T). Co: Semilla (T). SAm: Abono, siembra (T). Al: Consumo, in natura (FR); ensaladas, tallos cocidos (T). Med: Tratamiento de tos, pétalos en infusión, FL; tratamiento de afecciones pulmonares, tratamiento de la gripe, controlar la presión arterial, limpieza del colon, tratar la artritis, controlar la gastritis, in natura o en jugo, FR; inflamación y dolor muscular, cataplasma (T); tratamieto afecciones pulmonares, tratamiento de gripe, perder peso, prevención del cáncer, tratamiento de la artritis, limpieza del colon, control de fiebre, diabetes,presión arterial, mucílago licuado (T). Or: Decoración (PC). Tec: Máscaras para el cabello o base de shampoo, los tallos son licuados y mezclados con otros ingredientes; purificación de agua, hervir junto con el agua contaminada (T).
<i>Opuntia quitensis</i>	higo silvestre, higo, penco de monte	Al: Consumo in natura (FR). Med: Tratamiento de la tos, pétalos en infusión (FL)
<i>Opuntia soederstromiana</i>	higo silvestre, higo, penco de monte	Agt: Forraje para ganado (PC). Agr: Cerca viva (PC). SAm: Alimento para aves silvestres, in natura (FR). Al: Consumo esporádico, in natura (FR). Med: Tratamiento afecciones pulmonares, pétalos en infusión, (FL); limpieza del colon, mucílago licuado; tratar las várices, dolor de espalda, cataplasma (T)



Figura 2. Algunos usos por parte de la comunidad estudiada. a) Plantas ornamentales jóvenes de *Austrocyllindropuntia cylindrica* y *Austrocyllindropuntia subulata* junto con otras especies introducidas; b) Cultivo de *Opuntia ficus-indica* en el municipio de Cucaita (Boyacá); c) *Opuntia soederstromiana* como cerca viva. d. Cladodios de *Opuntia ficus-indica* en descomposición para realizar compostaje. Fotografías de: Daniela Porras-Flórez.

Tabla 2. Resumen de las relaciones entre datos etnobotánicos y factores socioeconómicos.

	No. de plantas usadas	Categorías de uso	RQZ
Edad	R=0,126*	R=0,139*	R=0,16*
Género	Chi=4,23	Chi=6,50*	Chi=1,37
Nivel de estudios	Chi=20,28*	R= -0,073	Chi=8,34
Ocupación	Chi=15,6**	Chi=11,50*	Chi=7,90
Tiempo de residencia	R=0,112*	R=0,12	R=0,112**

Nota: Índice de Riqueza de Conocimiento (RQZ). Reporte estadístico y su Significancia al (10%) (*), (5%) (**), (1%) (***).

Tabla 3. Número de citas, índice de valor de uso e importancia relativa. C: Cuaita, R: Ráquira, V: Villa de Leyva.

Especie	No. Citaciones	Valor de uso (UVs)			Importancia relativa (RI)		
		C	R	V	C	R	V
Cactoideae							
<i>Mammillaria columbiana</i>	299	0,9	0,74	0,82	0,7	0,41	0,87
<i>Melocactus andinus</i>	114	-	0,63	-	-	0,41	-
<i>Melocactus curvispinus</i>	114	-	0,63	-	-	0,41	-
Opuntioideae							
<i>Austrocylindropuntia cylindrica</i>	104	0,27	0,26	0,2	0,97	0,2	0,87
<i>Austrocylindropuntia cylindrica</i>	104	0,26	0,26	0,3	0,7	0,2	0,58
<i>Cylindropuntia tunicata</i>		-	-	0,0	-	-	0,0
<i>Opuntia ficus-indica</i>	341	1,85	1,06	1,06	2,0	2,0	2,0
<i>Opuntia quitensis</i>	70	-	0,45	-	-	0,41	-
<i>Opuntia soederstromiana</i>	244	0,94	0,86	1,0	1,0	0,41	1,7

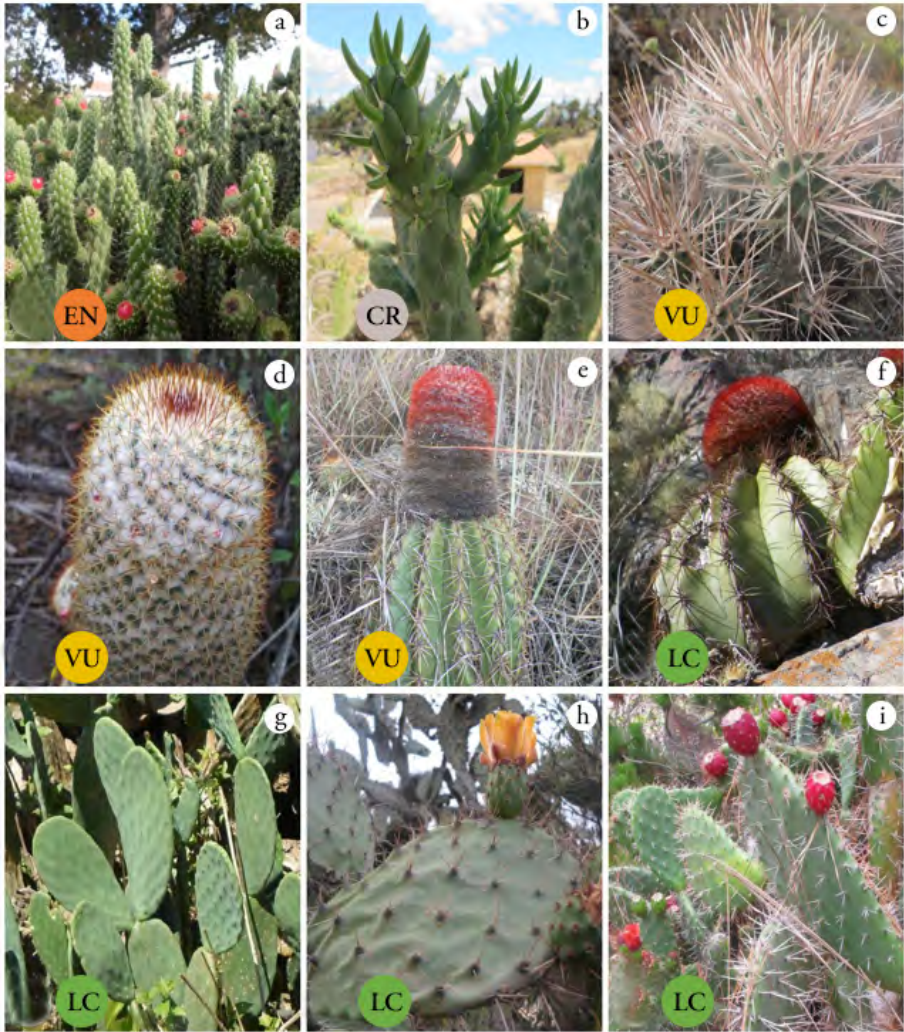


Figura 3. Especies reportadas para la zona de estudio, entre paréntesis se indica el váucher. a) *Austrocylindropuntia cylindrica* (UPTC-H 30067); b) *Austrocylindropuntia subulata* (UPTC-H 30068); c) *Cylindropuntia tunicata* (UPTC-H 30069); d) *Mammillaria columbiana* (UPTC-H 30070); e) *Melocactus andinus* (UPTC-H 30073); f) *Melocactus curvispinus* (UPTC-H 30074); g) *Opuntia ficus-indica* (UPTC-H 30071); h) *Opuntia quitensis* (UPTC-H 30072); i) *Opuntia soederstromiana* (UPTC-H 30066).

Fotografías de: Daniela Porras-Flórez, a–d, g–i; Iván Felipe-Vargas: e, f.

Se observó que los adultos mayores de 50 años o más, emplean las cactáceas en mayor proporción, en comparación con los jóvenes menores de 30 años. No se encontraron diferencias significativas entre el índice de riqueza de conocimiento y el género, indicando que, tanto hombres como mujeres, valoran las plantas por igual; sin embargo, se notó una tendencia leve, donde las mujeres predominan en el uso medicinal (69 %) y ornamental (55 %), en contraste, los hombres se destacan más en prácticas agroecológicas (52 %) y agropecuarias (75 %).

Las actividades registradas reflejan la economía predominante en cada municipio. Cucaita, se destaca por su enfoque agrícola, mientras que Ráquira y Villa de Leyva son conocidas por su turismo y actividades comerciales relacionadas. De los participantes, el 35 % son agricultores, el 33 % se dedican a labores domésticas, el 5,0 % son artesanos, otro 5,0 % son comerciantes, el 1,0 % son trabajadores independientes y el resto, se distribuye en diversos oficios, como conducción, construcción, guía turístico, hilado de lana, minería, redes eléctricas, seguridad y soldadura.

Estudios sobre variables socioeconómicas profundizaron sobre la comprensión de cómo estos factores influyen en el conocimiento y uso de las plantas nativas, facilitando la identificación de estrategias para promover la sostenibilidad regional (De Oliveira-Campos *et al.* 2015); por ejemplo, se reporta que los adultos, en el rango de edad de 55 a 90 años, poseen un mayor conocimiento local sobre la flora, debido a una vida de intercambios de saberes y experiencias (Galvis-Rueda & Torres-Torres, 2017). Por otro lado, los jóvenes muestran un menor interés por la biodiversidad local, atraídos más por actividades tecnológicas (Santos *et al.* 2020).

En estudios comparativos, como en la Caatinga de Brasil, se encontró que las preferencias en el uso de cactáceas varían según el género y están ligadas a las labores diarias (Marques de Lucena *et al.* 2013; Lucena *et al.* 2015). En cuanto a la ocupación, Martínez-Ballesté *et al.* (2006) señalan que la agricultura puede reducir el conocimiento biológico, al transformar el paisaje y afectar la biodiversidad; sin embargo, Arias-Toledo *et al.* (2007) destacan que las personas que dependen directamente de su entorno natural suelen conocer un mayor número de especies. De manera similar, De Oliveira-Campos *et al.* (2015) reportaron que los habitantes de largo plazo en zonas semiáridas de Brasil poseen un conocimiento más profundo de las especies alimenticias nativas, resultado de su interacción con el entorno.

Índices etnobotánicos: el índice de riqueza de conocimiento individual (RQZi) revela un conocimiento limitado de todas las especies en cada municipio. Entre el 10 y el 40 % de las personas obtuvieron un RQZi de 0,4 a 0,6, lo que representa, aproximadamente, la mitad de las especies, mientras que hasta un 10 % de los participantes las desconocen completamente. El mantener el conocimiento local depende de que se mantengan las relaciones sociales, a través de la familia y los colectivos comunitarios (Zarger & Stepp, 2004).

Cucaita, se caracteriza por ser un municipio de tradición agrícola, pequeño en extensión (44 Km²) y donde la población rural

encuestada tiene algún tipo de relación familiar o de colectivos comunitarios; mientras que Ráquira y Villa de Leyva presentan una mayor extensión (233 Km² y 128 km², respectivamente) y la mayoría de los participantes no se conocen. Esto trae, como consecuencia, que entre más pequeño sea el municipio, las redes sociales son más cercanas y la interacción entre los habitantes es mayor, lo que facilita la transferencia del conocimiento y la valoración de su biodiversidad cactológica, a diferencia de los municipios más grandes, donde las viviendas están más distanciadas y no suelen haber relaciones tan cercanas.

En Ráquira y en Villa de Leyva se presentan actividades turísticas y comerciales, como la venta de artesanías, gastronomía y planes al aire libre. Lo anterior, podría afectar el conocimiento de la biodiversidad cactológica, ya que su ingreso económico no depende directamente de ella, además, en Villa de Leyva han inmigrado personas extranjeras, cambiando aspectos culturales del territorio. Estos cambios, junto con la inclusión de otros grupos sociales en la región, ocasiona que las especies nativas no sean usadas y valoradas como elementos que mitigan la erosión de los suelos y la protección del recurso hídrico (Castellanos Camacho, 2011).

Índice de valor de uso: en los tres municipios, *O. ficus-indica* se destaca con el mayor valor (Tabla 3). Es la única cactácea cultivada, ampliamente conocida y utilizada por la comunidad rural, gracias a características, como la ausencia o presencia de muy pocas espinas, el tamaño mayor de sus cladodios y frutos. En el marco de dos estudios etnobotánicos realizados en la provincia de Córdoba, en Argentina, por Luján Ahumada & Trillo (2017) y Torrico-Chalabe & Trillo (2019), destacan a *O. ficus-indica* como la más mencionada y con diferentes tipos de uso, evidenciando su importancia como recurso natural.

Los cladodios y frutos de *O. ficus-indica* se comercializan, tanto local como nacional y tienen una posición destacada en los mercados internacionales, lo cual, explica su reconocimiento en el área de estudio. En Villa de Leyva se ha identificado que otras especies de *Mammillaria* y *Opuntia* tienen un valor de uso más bajo (0,07).

Índice de importancia relativa: en los tres municipios, *Opuntia ficus-indica* también presenta el mayor valor (Tabla 3), con 28 usos, distribuidos en ocho categorías. Por el contrario, las otras ocho especies muestran una importancia relativamente baja, con la mayoría de los valores por debajo de uno y los usos limitados, a entre dos y cinco categorías.

Localmente, *O. ficus-indica* no se explota suficientemente, ya que los participantes, que son pequeños productores no capitalizados, reportan un uso escaso, en contraste, los cultivadores aprovechan mejor la planta, al conocer sus propiedades. Globalmente, se están implementando programas para el desarrollo agrícola en regiones áridas y semiáridas que integran este cultivo, el cual, ha ganado relevancia en respuesta al aumento de problemas, como el calentamiento global y la desertificación (Louhaichi *et al.* 2018).

Conservación: para las poblaciones analizadas en el área de estudio, *A. cylindrica* y *A. subulata* son especies potencialmente “En Peligro” y “Peligro Crítico”, con un área de 3.122 km² y 8.0 km², respectivamente; *Cylindropuntia tunicata* (10,295 km²), *M. columbiana* (18,247 km²) y *M. andinus* (9,301 km²) son especies potencialmente “Vulnerables” y finalmente, *M. curvispinus* (120,061 km²), *O. ficus-indica* (151,784 km²), *O. quitensis* (151,784 km²) y *O. soederstromiana* (60,135 km²), se pueden considerar especies con “Preocupación Menor”.

En Villa de Leyva, los lugareños desestiman las poblaciones de *C. tunicata* y han intentado erradicarlas, debido al dolor y al malestar que causan sus espinas al incrustarse en la piel de los animales y campesinos. Durante las temporadas secas, se producen incendios no controlados que, según informantes, han llevado a la desaparición de pequeñas poblaciones de *M. columbiana*, en las zonas montañosas del municipio.

En contraste, los géneros *Mammillaria* y *Melocactus* son gravemente afectados por la extracción completa de individuos de su hábitat, incluyendo raíces y tallos, para uso artesanal y ornamental y no se observa reposición de individuos por parte de las comunidades. Aspectos discordantes a otros estudios, como los de Demaio & Trillo (2022), en donde identificaron la diversidad de especies comercializadas de cactáceas nativas, en una provincia de Argentina, quienes apoyados en su conocimiento local y su flexibilidad de manejo en la siembra de esas especies, no ponen en riesgo los taxones comercializados.

Según la plataforma de la IUCN (2024), las especies *A. subulata*, *C. tunicata*, *M. columbiana*, *Melocactus curvispinus*, *O. quitensis* y *O. soederstromiana* se encuentran categorizadas en preocupación menor (LC) (Arreola *et al.* 2013; Nassar *et al.* 2013; Arreola *et al.* 2017; Loaiza, 2017a; Loaiza, 2017b; Cáceres & Roque, 2020) y la única considerada en peligro de extinción (EN) es *Melocactus andinus*; sin embargo, de acuerdo con el presente estudio y las exploraciones botánicas realizadas en el área de estudio, la consulta de pliegos de herbario y las observaciones proporcionadas por algunos pobladores, se actualizó, a nivel nacional, la categoría de cada una de ellas (Figura 3).

En Villa de Leyva es común que durante la temporada seca se presenten incendios forestales, debido al mal manejo y disposición de las basuras, que han llegado, según los informantes, a desaparecer pequeñas poblaciones de todas las especies presentes en la zona montañosa, especialmente, de *M. columbiana*.

Con relación a la remoción de las ramas de las especies de *Austrocylindropuntia* y *Opuntia* por parte de los pobladores para diversos usos, podría ser comparado con el estudio de De Lima-Nascimento *et al.* (2021), con la especie *Cereus jamacaru*, quienes encontraron que al cortar las ramas basales, el crecimiento de las ramas externas es menor, interfiriendo en procesos de floración y de fructificación; sin embargo, aunque podría ser similar en estos géneros, al momento no se han evaluado los efectos secundarios.

Melocactus es un género, cuyas especies no se reproducen de forma vegetativa y necesariamente debe ocurrir la polinización para la formación de las semillas (Taylor, 1991), por lo que el consumo esporádico de los frutos afecta la dispersión de estas especies. En Colombia, *Melocactus andinus* es una especie “Vulnerable” (VU), dada su distribución.

Calero (2011) presentó el plan de manejo de *Melocactus curvispinus* para el departamento del Valle del Cauca y basado en los criterios de la IUCN categorizó la especie en “Peligro de Extinción” (EN), a nivel regional, causado por cambios en el uso del suelo, expansión agrícola y urbana, además de la erosión, debido a los fuertes vientos provenientes del Pacífico. Cabe resaltar que se han realizado actividades de conservación y de propagación de la especie junto con la comunidad. A nivel nacional, la especie se categoriza como “Preocupación Menor” (LC), bajo el criterio B1 de la IUCN (2024), dada la extensión de ocurrencia y su rango de distribución.

Finalmente, se concluye que los participantes aprovechan poco la flora cactológica de su región. La categoría de uso más común es alimenticia, especialmente, con los frutos de *Opuntia ficus-indica* y *Opuntia soederstromiana*, seguido el uso ornamental, el cual, predomina en especies, como *Mammillaria columbiana*, *Melocactus andinus* y *Melocactus curvispinus*, mientras que los usos medicinales, principalmente de tallos y flores, ocupan el tercer lugar.

O. ficus-indica se destaca como la especie con mayor valor de uso e importancia, seguida de *O. soederstromiana*, que se perfila con potencial económico en la región. Las otras siete especies se utilizan, ocasionalmente, en ventas informales o consumo doméstico de frutos.

La mayoría de los participantes reconocen solo la mitad o menos de las cactáceas locales, ya que su atención y conocimiento se centra en cultivos tradicionalmente comerciales, como la cebolla y la papa, en zonas húmedas; esto resalta la necesidad de fomentar la conciencia sobre los beneficios económicos de incorporar especies adaptadas a zonas semiáridas, resistentes al cambio climático y a la escasez de agua.

Los factores que más influyen en el conocimiento sobre la riqueza de cactáceas son la edad y el tiempo de residencia en la zona. Los residentes, entre 40 a 60 años o más, son quienes más reconocen estas especies; por ello, se recomienda implementar capacitaciones para los jóvenes de las áreas rurales, incentivando el cultivo sustentable y, a gran escala, en las comunidades semiáridas altoandinas, para integrar estas especies en la economía familiar.

La extracción para fines ornamentales y percepciones negativas de peligrosidad han puesto en riesgo a especies, como *Cylindropuntia tunicata*, *Mammillaria columbiana*, *Melocactus andinus* y *Melocactus curvispinus*. Esto subraya la importancia de desarrollar planes de conservación específicos para estas especies amenazadas.

Agradecimientos. Agradecemos a los campesinos de los municipios de Cucaita, Ráquira y Villa de Leyva, por su participación en las entrevistas, así como a Andrés Espino, Yamith Vega y Carlos Alberto Saba, por su acompañamiento en las exploraciones botánicas. Dedicado a Leopoldo Arrieta-Violet (1957-2021). **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 presentados. **Financiación:** A la Vicerrectoría de Investigación y Extensión-VIE de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. **Contribución de los autores:** Daniela Porras-Flórez, Sofía Albesiano, Kendry Hernández-Herrera y Nubia Gómez-Velasco conceptualización, investigación, curaduría de los datos, escritura, revisión y edición.

REFERENCIAS

- ALBESIANO, S.; RANGEL-CHURIO, J.O. 2006. Estructura de la vegetación del cañón del río Chicamocha, 500-1200 m; Santander-Colombia: una herramienta para la conservación. *Caldasia*. 28(2):307-325.
- ANDERSON, E.F. 2001. The cactus family. Ed. Timber Press. Estados Unidos. 776p.
- ARIAS, S.; VÉLIZ, M.E. 2006. Diversidad y distribución de las Cactaceae en Guatemala. En: Cano, E.B. (ed.). Biodiversidad de Guatemala. 1. Ed. Universidad de Guatemala. p.229-238.
- ARIAS-TOLEDO, B.A.; GALLETO, L.; COLANTONIO, S. 2007. Uso de plantas medicinales y alimenticias según características socioculturales en Villa Los Aromos (Córdoba, Argentina). *Kurtziana*. 33(1):79-88.
- ARREOLA, H.; BÁRCENAS-LUNA, R.; CHÁZARO, M.; CORRAL-DÍAZ, R.; GOETTSCHE, B.K.; HEIL, K.; GUADALUPE-MARTÍNEZ, J.; SÁNCHEZ, E.; TERRAZAS, T.; TERRY, M. 2013. *Cylindropuntia tunicata*. The IUCN red list of threatened species. Version 2023-1. Disponible desde internet en: <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2017-3.RLTS.T152642A121482267.en>
- ARREOLA, H.; ISHIKI, M.; TERRAZAS, T.; HAMMEL, B.; NASSAR, J. 2017. *Melocactus curvispinus* (amended version of 2013 assessment). The IUCN red list of threatened species 2017: e.T152448A121535254. Disponible desde Internet en: <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2017-3.RLTS.T152448A121535254.en>
- ARRIETA-VIOLET, L.; ALBESIANO, S.; MEDINA, O.J.; CHAPARRO, M.P.; CASTRO, G.A.; OTÁLVARO, A.M.; LEIVA, J.A.; PATARROYO-HERNÁNDEZ, W.F. 2022. ¿En qué medida la caracterización bioquímica, bromatológica, molecular, morfológica y reológica de *Austrocylindropuntia subulata*, *Opuntia dillenii* y *Opuntia ficus-indica* nativas de Boyacá, permiten desarrollar alternativas de aprovechamiento tecnológico para aportar a la seguridad alimentaria del departamento de Boyacá? En: Ariza, M.J. (ed.). Boyacá Bio. Acciones para la conservación y sostenibilidad. Vol. 1. Ed. Universidad Santo Tomás, seccional Tunja. p.102-108.
- BACHMAN, S.; MOAT, J. 2012. GeoCAT-an open source tool for rapid Red List assessments. Disponible desde Internet en: <http://geocat.kew.org>
- BADII, M.H.; CASTILLO, J.; GUILLEN, A. 2008. Tamaño óptimo de la muestra. *Innovaciones de Negocios*. 5(9):53-65.
- BRAVO-HOLLIS, H.; SÁNCHEZ-MEJORADA, H. 1991. Las cactáceas de México. Ed. Universidad Nacional Autónoma de México. México. 743p.
- CÁCERES, F.; ROQUE, J. 2020. *Austrocylindropuntia subulata* (amended version of 2017 assessment). The IUCN red list of threatened species 2020: e.T152809A183112856. Disponible desde Internet en: <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2020-3.RLTS.T152809A183112856.en>
- CALERO, V. 2011. *Melocactus curvispinus* subsp. *loboguerreroi*. En: Botina, J.R.; Posada, J.G.; Bermúdez, F.G. (eds). Planes de manejo para la conservación de 22 especies focales de plantas en el departamento del Valle del Cauca. Ed. Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, CVC y Fundación Agua Viva, FUNAGUA. Colombia. p.139-150.
- CASAS, A.; OTERO-ARNAIZ, A.; PÉREZ-NEGRÓN, E.; VALIENTE-BANUET, A. 2006. Manejo y domesticación de Cactáceas en Mesoamérica. En: Arroyo, M.T.K.; Zedillo, C. (eds). Zonas Áridas. Ed. Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad (México). p.73-103.
- CASTELLANOS CAMACHO, L.I. 2011. Conocimiento etnobotánico, patrones de uso y manejo de plantas útiles en la cuenca del río Cane-Iguaque (Boyacá-Colombia): una aproximación desde los sistemas de uso de la biodiversidad. *Ambiente & Sociedad*. 14(1):45-75. <https://doi.org/10.1590/S1414-753X2011000100004>
- DA SILVA, V.A.; DO NASCIMENTO, V.T.; SOLDATI, G.T.; MEDEIROS, M.F. T.; ALBUQUERQUE, U.P. 2014. Techniques for analysis of quantitative ethnobiological data: use of indices. En: Albuquerque, U.P.; Fernandes Cruz da Cunha, L.V.; Farias Paiva de Lucena, R.; Nobrega-Alves, R.R. (eds). Methods and techniques in Ethnobiology and Ethnecology. Ed. Humana Press. New York. p.379-395.
- DE LIMA-NASCIMENTO, A.M.; BENTO DA SILVA, J.S.; CASAS, A.; MARQUES DE LUCENA, C.; FAIRAS PAIVA DE LUCENA, R. 2021. Traditional management of Cactaceae: *Cereus jamacaru* DC as the native cactus most

- managed by rural communities in areas of Caatinga in Brazil. *Ethnobotany Research and Applications*. 21:1-12.
- DE OLIVEIRA-CAMPOS, L.Z.; ALBUQUERQUE, U.P.; PERONI, N.; ARAUJO, E.L. 2015. Do socioeconomic characteristics explain the knowledge and use of native food plants in semiarid environments in Northeastern Brazil? *Journal of Arid Environments*. 115:53-61. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2015.01.002>
- DEMAIO, P.H.; TRILLO, C. 2022. Una aproximación etnobotánica a la comercialización informal de cactáceas nativas en las rutas nacionales 9 y 34 en la provincia de Santiago del Estero, Argentina. *Boletín Sociedad Argentina de Botánica*. 57:419-430. <http://dx.doi.org/10.31055/1851.2372.v57.n3.37460>
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN, DNP. 2019. TerriData. Gobierno de Colombia, Bogotá. Disponible desde Internet en: <https://terridata.dnp.gov.co/index-app.html#/perfiles>
- ESTUPIÑÁN-GONZÁLEZ, A.C.; JIMÉNEZ-ESCOBAR, N.D. 2010. Uso de las plantas por grupos campesinos en la franja tropical del Parque Nacional Natural Paramillo (Córdoba, Colombia). *Caldasia*. 32(1):21-38.
- FIGUEROA-C., Y.; GALEANO, G. 2007. Lista comentada de las plantas vasculares del enclave seco interandino de la Tatacoa (Huila, Colombia). *Caldasia*. 29(2):263-281.
- GALVIS-RUEDA, M.; TORRES-TORRES, M. 2017. Etnobotánica y usos de las plantas de la comunidad rural de Sogamoso, Boyacá, Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*. 8(2):187-206. <https://doi.org/10.22490/21456453.2045>
- GARCÍA-BARRIGA, H. 1992. Flora medicinal de Colombia: botánica médica. Vol. 3. Tercer Mundo. Colombia. 538p.
- GONZÁLEZ, F. 2014. Villa de Leyva florece: Guía ilustrada de las plantas de Villa de Leyva y alrededores. Ed. Panamericana. Colombia. 320p.
- HUAYLLA, L.; SOLIZ, J.O.; SALVATIERRA, C. 2014. Uso y manejo de las cactáceas del parque nacional y área natural de manejo integrado serranía del Iñao (PN-ANMI). *Ciencias Tecnológicas y Agrarias Handbook*. 399p.
- INTERNATIONAL UNION FOR CONSERVATION OF NATURE, IUCN. 2024. The IUCN red list of threatened species. Version 2023-1. Disponible desde Internet en: <https://www.iucnredlist.org>
- KIESLING, R.; FERRARI, O. 2005. 100 cactus argentinos. Ed. Albatros. Argentina. 128p.
- LASTRA, R.P. 2000. Encuestas probabilísticas vs. no probabilísticas. *Política y Cultura*. 13:263-276.
- LOAIZA, C. 2017a. *Opuntia quitensis* (amended version of 2013 assessment). The IUCN red list of threatened species 2017: e.T151698A121562837. Disponible desde Internet en: <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2017-3.RLTS.T151698A121562837.en>
- LOAIZA, C. 2017b. *Opuntia soederstromiana* (amended version of 2013 assessment). The IUCN red list of threatened species 2017: e.T152719A121606841. Disponible desde Internet en: <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2017-3.RLTS.T152719A121606841.en>
- LÓPEZ-CAMACHO, R.; SARMIENTO, C.; ESPITIA, L.; BARRERO, A.M.; CONSUEGRA, C.; GALLEGOCASTILLO, B. 2016. 100 plantas del Caribe Colombiano. Usar para conservar: aprendiendo de los habitantes del bosque seco. Ed. Fondo Patrimonio Natural. Colombia. 240p.
- LOUHAICHI, M.; NEFZAOU, A.; GUEVARA, J.C. 2018. El nopal en los ecosistemas, bienes y servicios. En: Ingles, P.; Mondragón, C.J.; Nefzaoui, A.; Sáenz, C. (eds). *Ecología del cultivo, manejo y usos del nopal*. Ed. FAO, Centro Internacional de Investigaciones Agrícolas en Zonas Áridas. Italia. p.163-174.
- LUCENA, C.M.; CARVALHO, T.K.N.; RIBEIRO, J.E.S.; QUIRINO, Z.G.M.; CASAS, A.; LUCENA, R.F.P. 2015. Conhecimento botânico tradicional sobre cactáceas no semiárido do Brasil. *Gaia Scientia (Brasil)*. 9(2):77-90.
- LUJÁN AHUMADA, M.; TRILLO, C. 2017. Diversidad de especies naturalizadas del género *Opuntia* (Cactaceae) utilizadas por los pobladores del norte de Córdoba (Argentina). *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica*. 52(1):191-206. <https://doi.org/10.31055/1851.2372.v52.n1.16919>
- MARQUES DE LUCENA, C.; FARIAS PAIVA DE LUCENA, R.; COSTA, G.M.; NUNES CARVALHO, T.K.; GOMES DA SILVA COSTA, G.; DA NÓBREGA ALVES, R.R.; DUARTE PEREIRA, D.; DA SILVA RIBEIRO, J.E.; BELARMINO ALVES, C.A.; MACIEL QUIRINO, Z.G.; NOGUEIRA NUNES, E. 2013. Use and knowledge of Cactaceae in Northeastern Brazil. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*. 9(1):1-11. <https://doi.org/10.1186/1746-4269-9-62>
- MARTÍNEZ-BALLESTÉ, A.; MARTORELL, C.; CABALLERO, J. 2006. Cultural or ecological sustainability? The effect of cultural change on Sabal palm management among the lowland Maya of Mexico. *Ecology and Society*. 11(2):27. <http://dx.doi.org/10.5751/ES-01803-110227>

- NASSAR, J.; ISHIKI, M.; HAMMEL, B.; HERNÁNDEZ, H.M.; DURÁN, R. 2013. *Mammillaria columbiana*. The IUCN red list of threatened species. version 2023-1. Disponible desde Internet en: <https://www.iucnredlist.org/es/species/152832/121623899>
- OCHOA, M.J.; BARBERA, G. 2018. Historia e importancia agroecológica y económica. En: Inglese, P; Mondragón, C.J.; Nefzaoui, A.; Sáenz, C. (eds). Ecología del cultivo, manejo y usos del nopal. Ed. FAO, Centro Internacional de Investigaciones Agrícolas en Zonas Áridas. Italia. p.1-11.
- OSTOLAZA-NANO, C. 2014. Todos los cactus del Perú. Ed. Franco Eirl. Perú. 320p.
- PEDROSA, K.M.; DE FARIA-LOPES, S.; CARVALHO, T.K.N.; DE LUCENA, C.M.; DE LIMA-NASCIMENTO, A.M.; DE LUCENA, R.F.P. 2020. Traditional management of Cactaceae by local populations in the semi-arid region of Brazil. *Ethnobiology and Conservation*. 9:1-28.
- POCHETTINO, M.L. 2015. Botánica económica: las plantas interpretadas según tiempo, espacio y cultura. Ed. Sociedad Argentina de Botánica. Argentina. 448p.
- PORRAS-FLÓREZ, D.; ALBESIANO, S.; ARRIETA-VIOLET, L. 2017. El género *Opuntia* (Opuntioideae–Cactaceae) en el departamento de Santander, Colombia. *Biota Colombiana*. 18(2):111-131. <http://dx.doi.org/10.21068/c2017.v18n02a07>
- PORRAS-FLÓREZ, D.; ALBESIANO, S.; ARRIETA-VIOLET, L. 2020. Typification of the name *Opuntia soederstromiana* (Cactaceae), a new record for the Flora of Colombia. *Phytotaxa*. 452(2):116-123. <https://doi.org/10.11646/phytotaxa.452.2.1>
- SANTOS, S.D.S.N.; MARTINS, C.S.G.; DE CAMPOS-MARTINS, F. 2020. Is the knowledge about the wild birds influenced by the socioeconomic conditions of the human populations? *Ethnobiology and Conservation*. 9:14. <http://dx.doi.org/10.15451/ec2020-05-9.14-1-19>
- TAYLOR, N. 1991. The genus *Melocactus* (Cactaceae) in Central and South America. *Bradleya*. 9:1-80. <https://doi.org/10.25223/brad.n9.1991.a1>
- TORRICO-CHALABE, J.K.; TRILLO, C. 2019. Diferencias de conocimientos, valoración y uso de Cactáceas entre pobladores de Salinas Grandes y Sistema Serrano (Córdoba, Argentina). *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica*. 54(1):125-136. <http://dx.doi.org/10.31055/1851.2372.v54.n1.23590>
- VÁZQUEZ-SÁNCHEZ, M.; TERRAZAS, T.; ARIAS, S. 2012. El hábito y la forma de crecimiento en la Tribu Cactaeae (Cactaceae, Cactoideae). *Botanical Sciences*. 90(2):97-108.
- VILLALOBOS, S.; VARGAS, O.; MELO, S. 2007. Uso, manejo y conservación de “yosú” *Stenocereus griseus* (Cactaceae) en la alta Guajira Colombiana. *Acta Biológica Colombiana*. 12(1):99-112.
- ZARGER, R.; STEPP, J. 2004. Persistence of botanical knowledge among Tzeltal Maya children. *Current Anthropology*. 45(3):413-418. <http://dx.doi.org/10.1086/420908>

Ecosystem services assessment of the Jardín Botánico de Bogotá

Valoración de servicios ecosistémicos del Jardín Botánico de Bogotá

Vandréé Julián Palacios-Bucheli^{1*} ; Lizeth Daniela Cristancho-Gavilán² ; Julio César Gaitán-Silva² ; Yerly Caterinhe Gil Muñoz² ; Manuel Enrique Morales-Linares² ; David Alejandro Reyes-Rico² ; Aura Mayerly Martínez-Rojas³ 

¹Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A., Maestría en Agroforestería Tropical, Grupo de Investigación Producción agrícola Sostenible. Bogotá, Colombia; e-mail: vpalacios@udca.edu.co

²Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A., Especialización en Manejo Sostenible de Suelos, Grupo de Investigación Producción Agrícola Sostenible. Bogotá, Colombia; e-mail: lizcristancho@udca.edu.co; jugaitan@udca.edu.co; yergil@udca.edu.co; manumorales@udca.edu.co; davireyes@udca.edu.co

³Jardín Botánico de Bogotá, José Celestino Mutis, Subdirección Técnica Operativa. Bogotá, Colombia; e-mail: armartinez@jbb.gov.co

*corresponding author: vpalacios@udca.edu.co

How to cite: Palacios-Bucheli, V.J.; Cristancho-Gavilán, L.D.; Gaitán-Silva, J.C.; Gil-Muñoz, Y.C.; Morales-Linares, M.E.; Reyes-Rico, D.A.; Martínez-Rojas, A.M. 2024. Ecosystem services assessment of the Jardín Botánico de Bogotá. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 27(2):e2525. <http://doi.org/10.31910/rudca.v27.n2.2024.2525>

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: September 21, 2023

Accepted: November 23, 2024

Edited by: Helber Adrián Arévalo Maldonado

ABSTRACT

The green areas of Bogotá provide well-being to residents and visitors of the Colombian capital. The ecological infrastructure of Jardín Botánico de Bogotá (JBB) allows its visitors to enjoy various ecosystem services. This study aims to estimate the monetary value of the ecosystem services provided by the JBB. The research was conducted at the JBB. A forest inventory was performed for the biophysical valuation, including individuals with a diameter at breast height (DBH) greater than 10 cm. Total height and DBH were recorded for each individual. The timber volume and carbon captured in the aerial biomass of each individual and species were determined. Carbon capture was calculated using the allometric formula for montane humid forests. The provisioning ecosystem service of timber was valued based on the timber volume and the domestic timber price of US\$270.9 per cubic meter. The monetization of carbon capture included the value of carbon credits from the European Union, used to determine the atmospheric regulation ecosystem service. The travel cost methodology involved surveying JBB visitors to determine the recreational cultural ecosystem service. Visitors were asked about their origin and visit frequency. The analysis included the entrance fee of US\$1.05 and visitors' meal costs. Finally, the cost/benefit monetary value was aggregated with the travel cost monetary value to calculate the total economic value (TEV). The JBB provides ecosystem services with a TEV of US\$68,517,466.50 per year.

Keywords: Biophysical valuation; Carbon captured; Timber volume; Total economic value; Travel costs.

RESUMEN

Los espacios verdes de la ciudad de Bogotá son áreas que generan bienestar a los moradores y visitantes de la capital colombiana, en particular el Jardín Botánico de Bogotá (JBB) por su infraestructura ecológica que permite el disfrute de servicios ecosistémicos a sus visitantes. El presente estudio, tiene como propósito generar una aproximación del valor monetario de los servicios ecosistémicos que presta el JBB. El estudio se llevó a cabo en el JBB José Celestino Mutis. Para la valoración biofísica se realizó un inventario de las especies maderables, se incluyó altura total y diámetro a la altura del pecho. Se determinó el volumen de madera de cada individuo y por especie, igualmente, el carbono almacenado en la biomasa aérea. Para la estimación del carbono se utilizó una ecuación alométrica. Con los valores del volumen se monetizó los metros cúbicos de madera con un valor doméstico de US\$270,9 por m³ para determinar el servicio de provisión de madera. Con los valores del carbono se monetizaron los valores de los créditos de carbono de la Unión Europea para determinar el servicio de regulación atmosférica. Para los costos de viaje, se aplicó una encuesta a visitantes del JBB para determinar el servicio cultural de recreación. En este caso, se incluyó el costo de ingreso al JBB, el cual tiene un valor de US\$1,05 y la alimentación. Finalmente, se calculó el valor económico total VET. Los servicios ecosistémicos proporcionados por el JBB generan un VET que alcanza los US\$68.517.466,5 al año.

Palabras clave: Carbono almacenado; Costos de viaje; Valoración biofísica; Valor económico total; Volumen de madera.

INTRODUCTION

The Jardín Botánico de Bogotá (JBB) is a green space covering approximately 19.5 hectares, located in the borough of Engativá, in Bogotá D.C., Colombia. This place is one of the main centers of research and conservation of biodiversity in the country, with a great variety of trees and plants of different species. The soil cover of the JBB is made up of ligneous species and provides ecosystem services to the overall community.

Natural capital provides humanity with goods and services known as ecosystem services (Li *et al.* 2023) in combination with the human capacity to associate and cooperate, natural capital enables many beneficial dynamics for humans (Constanza, 2016). Natural assets continuously generate both direct and indirect benefit streams for our well-being (De Groot *et al.* 2010; Bateman *et al.* 2011).

Society as a whole benefits from the ecosystem services produced in specific locations (Fisher *et al.* 2011). When an individual or community in any area of the planet makes decisions for its own benefit, it influences the other communities of the planet (Hagedorn, 2008). By knowing the functions and processes of natural assets, the benefits obtained, and an approximate value of ecosystem services, the decision-making process would be fully informed on the environmental costs of development or the benefits of conservation.

Biophysical valuation is the quantification of the natural goods regarding the supply of ecosystem services provided by a given landscape

(Shrestha *et al.* 2023), which includes the prediction of possible future changes in the supply of ecosystem services over time (Fu *et al.* 2018; Hu *et al.* 2021). This type of valuation includes specific assessment of the ecological importance of ecosystem components, e.g., estimation of biodiversity impacts (Saarikoski *et al.* 2022), or the amount of carbon stored in a forest. Biophysical valuation as a starting point for economic valuation is crucial considering the loss of ecosystems due to different causes and the consequent loss of ecosystem services (Bera *et al.* 2022; Basu *et al.* 2023; Bax *et al.* 2023; Wang *et al.* 2023; Zrelli *et al.* 2023).

Therefore, the purpose of this study is to generate an approximation of the monetary value of the ecosystem services provided by the JBB, based on the biophysical value, the economic value of provisioning services, atmospheric regulation services, and cultural recreation services.

MATERIALS AND METHODS

Study area. The study was conducted at the facilities of the Jardín Botánico José Celestino Mutis in Bogotá D.C., Colombia, which has a total area of 19.5 ha. Within the JBB, an area with a size of 0.8 ha was randomly selected for data collection. The area is located at coordinates 74°6'2.95"W and 4°40'6.69"N (Figure 1), with an annual rainfall of 797 mm and temperatures ranging between 8°C to 20°C (IDEAM, 2018).



Figure 1. Jardín Botánico José Celestino Mutis, Bogotá D.C. and its surroundings. Map construed in QGIS version 3.28.4-Firenze.

Regarding the selection of the study area for the biophysical valuation, the presence of arboreal, shrub or palm species was considered. Additionally, the determination of canopy cover was conducted over 18.7 ha of the JBB using the QGIS 3.30.2 Software; the 0.8 ha of sampled area were excluded from this analysis. Using the canopy cover area, the reference area of the JBB was established

to calculate the economic values associated with wood production and aerial carbon storage.

Analysis variables for the valuation of ecosystem services. The variables used for the analysis of ecosystem services and their valuation are described in Table 1.

Table 1. Analysis variables and indicators for the valuation of the ecosystem services provided by the Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis (JBB).

Methodology	Analysis variables			
	Variables		Indicators	
		Biophysics	Economic	
Cost/benefit (timber supply service and atmospheric regulation service)	Diameter at Breast Height - DBH (m)		Carbon (tons)	\$ carbon market prices
	DBH (m)	Height (m)	Volume of wood (m³)	Cubic measurement (m³)
Cost of travel (cultural recreation service)	Origin		Local	-Transportation value* from the locality or neighborhood -JBB ticket -Food
			-Flight tickets -Transportation value* from the airport -JBB ticket Food	
			-Flight ticket -Transportation value* from the airport -JBB ticket -Food - Value for accommodation	
	Frequency		Number of visits per year	

* Digital platform transport service.

Biophysical and economic valuation of ecosystem services.

Biophysical valuation. The biophysical valuation was conducted in the selected area, where an inventory of the timber species (DBH > 10 cm) was registered. The total height of the timber species was determined by an hypsometer and the DBH with dimetric tape. A total of 90 individuals were analyzed.

The data collected in the field were used to determine the volume of wood for each individual and by species. Likewise, to estimate the carbon stored in the aboveground biomass.

Calculation of standing timber volume. The following equation was used to calculate the volume of wood according to Yepes *et al.* (2011), Gutiérrez *et al.* (2013):

Volume (living trees) = $\left(\frac{\pi}{4}\right) * DBH^2 * Ht * FF$

DBH: Diameter at breast height in meters (m)

Ht: Total Height (m)

FF: Form factor (0.65)

Calculation of the volume of harvestable wood. The methodology proposed by Medina Arroyo *et al.* (2007), where wood waste in the commercial volume of living trees is 39.76%, with a remaining 60.24% of harvestable wood.

Carbon calculation. The equation proposed by Álvarez *et al.* (2012) was used to calculate carbon and adapted by Phillips *et al.* (2011) for the estimation of aboveground biomass. It should be noted that this equation is associated with montane rainforest:

BA = Exp (- 2.616382155 + (2.3733 * ln (D))

D: Diameter at breast height in centimeters (cm)

ln: Natural logarithm

From the aboveground biomass (AGB) values, carbon contents are obtained after multiplying the result of the AGB value by 0.5 (Phillips *et al.* 2011; Yepes *et al.* 2011), this value corresponds to the carbon content in the plant material (corresponding to 50% of the total biomass).

Given the result of C in kg, the value was divided by 1000 to obtain the data in tons (t).

Economic valuation

Cost-benefit methodology. Using the cost-benefit methodology, the economic valuation of the services of (i) timber provision and (ii) atmospheric regulation was conducted.

In order to obtain a total economic value (TEV), the values found in the volume and carbon calculations were oriented to an economic valuation; the m³ of timber volume and the tons of carbon obtained were monetized, for which a value of 270.9 USD per m³ of timber volume was used (Red Forestal, 2023), and the economic valuation of C per ton was determined taking as reference the values of the European Union carbon credits reported by Carbon Credits for the month of March 2023 (<https://carboncredits.com/carbon-prices-today/>), which corresponds to a value of 99.65 USD. Using the QGIS software, the canopy area of 18.7 ha (subtracting the 0.8 ha from the forest inventory data collection) of the JBB was estimated in order to obtain the missing canopy area with tree cover, which was 13.4 ha, then the 0.8 ha of the sample was added to the 13.4 ha of defined canopy, to obtain a total reference area of 14.2 ha. With this data it was possible to analyze the total economic value of the service of wood provision and the service of atmospheric regulation by the carbon stored in the aboveground biomass.

Travel cost methodology. The economic valuation of the cultural service of recreation was conducted using the travel cost methodology.

The travel cost valuation methodology involves the implicit price that the tourist pays for accessing a recreational site or for participating in a recreational activity (Juutinen *et al.* 2022; Xu & He, 2022). For this case, a survey was carried out among different visitors of the JBB between 09:00 a.m. and 05:00 p.m. on February 25, 2023, who were asked about their origin and frequency of their visits. To determine the origin, we gathered information on the country for foreigners, the department for non-local Colombians, and the neighborhood or borough for residents of Bogotá. Using this information, the individual's willingness to pay for the quantity of the good or service associated with an ecosystem in a year was calculated. Transportation costs included the value provided by a digital platform transportation service from the neighborhood or borough and return for local visitors, and from the airport and return for domestic and foreign visitors. Transportation costs for

domestic visitors included the value of airfare from the department of origin and return, for foreign visitors from the country of origin and return.

The cost of entrance to the JBB was included, which was 1.05 USD for all visitors. The value of food was included as follows: for local visitors, the value of a single meal per person (2.11 USD); for domestic and foreign visitors, the value of a day's food was included at 12.67 USD and 14.78 USD, respectively. In addition, the average value of overnight expenses for foreign visitors was included.

The information collected was used as a reference to calculate the average monetary expenditure of a day's visit to the JBB by local, national, and foreign beneficiaries. The average value was used to calculate the TEV for all the visits made in 2023 with the use of secondary information on income from that period to the JBB.

Data analysis. The values obtained for wood volume and C capture were extrapolated to the reference area of tree cover (Palacios, 2021) of the JBB, which corresponds to 14.2 ha. Subsequently, it was calculated for 1 ha; the total valuation (biophysical valuation) is the sum of the price obtained from the calculation of the volume of wood and carbon stored in 1 ha.

Regarding the methodology for the valuation of travel costs, once the average cost of a day's visit to the JBB was obtained, this value differentiated between local, national, and foreign visitors was multiplied by the number of visitors to the JBB in 2023. Finally, the values were calculated in units of time (year), in this case for the ecosystem service of timber provision, the value was depreciated to 20 years. In the case of stored C, because the species are limited to conservation use, the estimated value was assumed for one year.

After obtaining the total value of the cost/benefit analysis, the values of the travel cost methodology obtained in the year 2023 were added to obtain a total economic value of TEV including timber provisioning services, atmospheric regulation expressed in the benefit of clean air, and cultural recreation services (Palacios, 2021). For the purposes of comparisons in the report of findings and discussion of results, foreign currency values of March 2023 were used (exchange rate: 4736.03 USD).

RESULTS AND DISCUSSION

Biophysical valuation. A total of 90 individuals belonging to 31 forest species were found in the 0.8 ha analyzed (Table 2), with the three most abundant being *Escallonia pendula*, *Ficus andicola*, and *Oreopanax bogotensis*. The 90 individuals analyzed have a total volume of 33.88 m³ of wood and store about 21.94 tons of carbon. In terms of volume, the species with the largest volume of wood is *Decussocarpus rospigliosii* with 8.01 m³, while the species with the largest carbon storage is *E. pendula* with 4.97 tons.

The JBB is directly generating clean air for Bogotá, since the final benefit of the carbon uptake service of perennial ligneous species is reflected in the improvement of air quality (Zhang *et al.* 2023).

Despite the fact that the JBB is a transformed ecosystem, it stands out for the provision of atmospheric regulation services, however, natural ecosystems are more efficient in providing the ecosystem service of atmospheric regulation, as in the case of tropical forests,

which store between 40% and 55% of the carbon of terrestrial plants, being crucial for the functioning of the carbon cycles of the planet (Flores de Melo *et al.* 2024).

Table 2. Forest species found in the inventoried area of the Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis, the valuation of the volume of wood and carbon stored in the aboveground biomass, and the economic valuation in terms of wood and carbon stored.

No.	Taxonomic group	Common name	Scientific name	Number of individuals	Wood volume (m ³)	Aboveground biomass carbon (Ton)	Economic value of wood (Dollar)	Economic value of C stored (Dollar)
1	Altingiaceae	American sweetgum	<i>Liquidambar styraciflua</i>	1	0.55	0.32	147.8	32.1
2	Araceae	Quindío wax palm	<i>Ceroxylon quindiuense</i> (H. Karst.) H. Wendl.	1	0.59	0.24	160.4	24.0
3	Araliaceae	Mano de oso	<i>Oreopanax bogotensis</i> Cuatrec.	9	0.44	0.40	119.9	39.6
4	Bignoniaceae	Nacedero	<i>Delostoma integrifolium</i> D. Don	1	0.05	0.04	13.8	4.0
5		Chicalá	<i>Tecoma stans</i>	3	0.76	0.50	207.2	49.3
6	Escalloniaceae	Mangle de altera	<i>Escallonia pendula</i> var. <i>humboldtiana</i> Engl.	12	6.74	4.97	1,825.6	494.2
7	Fabaceae	Chachafruto	<i>Erythrina edulis</i> Pos.-Arang.	2	0.48	0.32	129.5	32.1
8		Alcaparro	<i>Senna viarum</i>	1	0.10	0.07	28.2	6.5
9	Fagaceae	Oak	<i>Quercus humboldtii</i>	2	0.92	0.48	250.4	47.2
10	Juglandaceae	Walnut - cedar tree	<i>Juglans neotropica</i> Diels	3	0.58	0.40	157.6	39.6
11	Lythraceae	Guaiacum	<i>Lafoensia acuminata</i> (Ruiz & Pav.) DC.	3	2.22	1.12	602.5	110.9
12	Melastomataceae	Morochillo	<i>Miconia alborosea</i> L. Uribe	4	0.27	0.15	72.1	15.2
13	Moraceae	Rubber fig	<i>Ficus andicola</i> Standl.	10	3.14	2.35	849.6	233.1
14		Tequendama rubber	<i>Ficus tequendamae</i> Dugand	2	1.67	1.03	452.1	102.8
15	Myrtaceae	Chilean myrtle	<i>Myrcia cucullata</i> O. Berg	1	0.13	0.15	34.6	15.3
16		Little guava	<i>Myrcianthes leucoxyla</i> (Ortega) McVaugh	3	0.48	0.27	131.3	26.6
17		Black guava	<i>Myrcianthes rhopaloides</i> (Kunth) McVaugh	3	0.75	0.49	203.7	48.4
18	Podocarpaceae	Pino romerillo	<i>Decussocarpus rospigliosii</i> (Pilg.) de Laub.	6	8.01	4.96	2,170.0	492.8
19		Colombian pine	<i>Podocarpus oleifolius</i> subsp. <i>columbianus</i> A.D. Silva & J.A. Silva	2	0.59	0.34	160.4	34.1
20	Phyllanthaceae	Motilón negro	<i>Hieronyma macrocarpa</i> Müll. Arg.	3	1.01	0.61	274.8	60.8
21	Proteaceae	Yolombo	<i>Panopsis suaveolens</i>		0.49	0.40	132.2	40.0
22	Rosaceae	Cherry tree	<i>Prunus serotina</i>	2	0.34	0.32	90.8	31.9
23	Rubiaceae	Naunape	<i>Simira cordifolia</i> (Hook. f.) Steyer.	1	0.21	0.13	55.6	13.4
24	Salicaceae	Willow	<i>Salix humboldtiana</i>	5	2.15	1.11	581.5	110.0
25	Sapindaceae	Cariseco	<i>Billia columbiana</i> Planch. & Linden	1	0.20	0.17	54.0	17.4
26			Unidentified 1	1	0.42	0.25	113.1	25.0
27			Unidentified 2	1	0.09	0.06	25.2	6.1
28			Unidentified 3	1	0.04	0.03	10.1	3.0
29			Unidentified 4	1	0.34	0.18	91.0	17.6
30			Unidentified 5	1	0.11	0.06	29.0	5.7
31			Unidentified 6	1	0.02	0.02	5.3	2.0
Total				90	33.88	21.94	9,179.3	2,180.5

Considering that the JBB has a canopy cover area of 14.2 ha, it can be inferred that in one hectare there are about 27.42 tons of C stored in 42.35 m³ of commercially harvestable wood. In the entire extension of the JBB, about 389.4 tons of carbon are stored in 601.3 m³ of commercially harvestable wood (Table 3). In cities, green spaces are a beneficial wealth for surrounding communities in the form of ecosystem services (Drew-Smythe *et al.* 2023) and may be fulfilling some functions performed by natural ecosystems. For example, in a study conducted in the mangroves of the Gulf

of Urabá in Colombia, it was found that the carbon stored in the aboveground part of the mangroves of the Atrato River delta reached 83 tons/ha, in the Rionegro cove 58 tons/ha, in Puerto César-Punta Coquito 43 tons/ha and in Turbo 38 tons/ha (Blanco-Libreros *et al.* 2015). Another example is a similar study conducted in the forests in the Jardín Botánico del Pacífico, Chocó, where an average of 48.2 tons/ha of carbon stored is reported (Torres-Torres *et al.* 2017).

Economic valuation

Cost/benefit. The ecosystem service of JBB wood provision in the analyzed area amounts to 8,146.6 USD. As for the regulating service related to C storage, the economic value amounts to 38,703.3 USD (Table 3). Equating these values to units of space and time, it is concluded that the economic value of JBB in terms of the timber provisioning service reaches 573.7 USD ha/year and the carbon storage regulation service reaches 2,725.6 USD ha/year; the two services together reach an economic value of 3,299.2 USD ha/year. Therefore, the JBB in its entire extension is generating an economic value of around 46,850 USD per year (Table 3).

A study conducted in the flood lands of Ghodaghodi, Nepal reveals that the approximate ecosystem service value of timber provision exceeds 442,000 USD per year, over an area of 2,563 ha (Aryal *et al.* 2021), for a value of 172.4 USD ha/year. This shows how JBB has great potential for timber supply, surpassing the economic value of other latitudes such as Nepal. Another example is the research by Hernández-Blanco *et al.* (2021), where the value of the timber and fuel provision service averages around 2,940 USD ha/year.

The economic value of the ecosystem service of air quality regulation in Iran's forested lands reaches 6 USD ha/year (Badamfirooz *et al.* 2021); a value much lower than that provided by JBB which corresponds to 2725.6 USD ha/year (Table 3). A similar case is recorded in the study by Aryal *et al.* (2021), where the carbon uptake service reaches 10 825.8 USD per year, which in terms of unit area is equivalent to 4.2 USD ha/year.

Travel costs. Most of the visitors surveyed are residents of Bogotá, followed by national visitors and finally foreign visitors (Table 4). Foreign visitors are from Germany, Chile, Costa Rica, Ecuador, Finland, Mexico, and the Netherlands. As for Colombian visitors, apart from Bogotá, the predominant cities of origin are Cali and Medellín.

The cultural ecosystem services provided by the JBB have an economic value of 68,517,466.5 USD per year; the value of one hectare amounts to 3,513,716.2 USD ha/year (Table 4). Economic valuation studies using the travel cost methodology have been applied to highlight the importance of cultural services such as landscape beautification and the enjoyment of natural ecosystems. In natural parks in Germany, it was determined that recreation ecosystem services provide an economic value ranging from 1812 to 2949 billion USD (Mayer & Woltering, 2018). In California, recreation ecosystem services from Tahoe's natural areas generate an economic value ranging from 1.35 to 1.84 billion USD/year (Nyelele *et al.* 2023). The peri-urban areas of Istanbul, specifically the water outfall in the Ömerli Catchment area, generate an economic value of approximately 10.24 billion USD (Cetin *et al.* 2021).

Total Economic Value (TEV). The ecosystem services provided by the JBB generate a total economic value reaching 68,564,316.5 USD on 19.5 ha per year, therefore, the value for one hectare amounts

to 68,520,765.8 USD year (Table 5). The resulting values are very relevant in terms of implementing strategies for the conservation of green spaces in Bogotá and the provision of ecosystem services, as they reflect the economic value of the enjoyment that visitors and nearby residents who can perceive the benefits associated with provisioning, regulating, and cultural services. This can be confirmed with similar studies in other regions of the world, for example, the study conducted by Verma *et al.* (2017), in which, the estimated value for various ecosystem services provided by tiger reserves in India is between 128 million USD and 271 million USD, annually. In terms of unit area, the value fluctuates between 862 USD and 2,923 USD per hectare per year, highlighting the importance of the tiger ecosystem and the need to develop mechanisms for protecting these areas. Economic valuation methods provide evidence that underpins the development of policy instruments to conserve ecosystem services (Azadi *et al.* 2021).

There are similar studies that seek to highlight the importance of different types of ecosystems in terms of ecosystem services through economic valuation. In Iran, the values in economic terms provided by the offshore and inland flooded areas of the country, is 67,665 USD and 42,171 USD, respectively (Badamfirooz *et al.* 2021). The economic value of landscape beauty of natural and agricultural ecosystems in Israel is 53,120 USD and 29,077 USD per km², respectively (Hatan *et al.* 2021). In Costa Rica, the economic value of ecosystem services provided by mangroves in the Gulf of Nicoya was determined to be 408 million USD/year (Hernández-Blanco *et al.* 2021). The buffer zone of the Sakabansi dam in northern Benin (Africa) provides ecosystem services estimated at an economic value of approximately 1,751 USD ha/year (Kader Baba & Hack, 2019).

Ecosystems, whether natural or transformed, are crucial for the provision of goods and services to humanity. The JBB offers provisioning, regulating, and cultural services, which provide well-being not only to visitors but also to the surrounding inhabitants of the site in question, and ultimately to the global community. This is because any action taken at one point on the planet affects the rest of the world positively or negatively. Translating the value of ecosystem services into economic terms is an important tool for generating actions that seek the conservation and maintenance of ecosystems. The values derived from the analyses provide a robust foundation for understanding the complexity of the functions ecosystems perform for human well-being. These functions, often intangible to the human senses, ultimately contribute to well-being as reflected in terms of physical and mental health.

Bogotá, with its dense population, should look to expand the supply of such ecosystem services for the enjoyment of its inhabitants. Therefore, it is recommended, on the one hand, to maintain the infrastructure of parks, wetlands, and natural capital in general, and on the other hand, to promote the expansion and creation of additional green spaces that provide provisioning, regulating, and cultural ecosystem services to society as a whole. In this regard, this study is a scientific basis that justifies the need to bring to public policy the conservation of natural ecosystems as transformed in Bogotá.

Table 3. Values found for carbon (C) storage, wood volume, economic value of the C storage regulation service and wood provisioning service in the study area and the total area of the Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis (JBB).

Variable analyzed	Findings in the study area (0.8 ha)	Findings projected to 1 ha and to the total area of JBB	
		1 ha	14.2 ha
C stored (Ton)	21.94	27.42	389.4
Wood volume (m³)	33.88	42.35	601.3
Value of C stored	2,180.5 USD	2,725.6 USD/year	38,703.3 USD/year
Value of wood	458.9 USD	574 USD/year	8,146.6 USD/year
TOTAL	2,639.4 USD	3,299.3 USD/year	46,850 USD/year

Table 4. Origin of visitors to the Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis in a day and in 2023, percentage of visits per year, average travel costs in a day, and economic value of the cultural ecosystem service of recreation in 19.5 ha and 1 ha in 2023.

Origin	Number of visitors in a day and in a year (2023)	Percentage of visits per year	Average travel costs per day (USD)	Travel costs USD/year	
				19.5 ha	1 ha
Locals	86 / 349,530	84.6	47	16,427,919.4	842,457.4
Domestic	10 / 36,688	8.9	153	5,613,205.86	287,856.7
Foreign	18 / 26,793	6.5	912	46,476,341.3	2,383,402.1
Total	114 / 413,011	100	—	68,517,466.5	3,513,716.2

Table 5. Total economic value TEV of the ecosystem services provided by the Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis using cost-benefit and travel cost methodologies.

Methodology	Area (ha)		
	0.8	1	14.2* ha and 19.5** ha
Cost / benefit (USD)*	2639.4	3299.3	46,850
Travel costs (USD)**	68,517,466.5		
TOTAL	68,520,105.9	68,520,765.8	68,564,316.5

Acknowledgments.

To the Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A for the support for the publication of this research and to the Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis for allowing the study to be conducted. Conflict of interest: The authors declare that there are no conflicts of interest. Authors' contribution: conceptualization, V.J.P.B.; data preparation, V.J.P.B., L.D.C.G., J.C.G.S., Y.C.G.M., M.E.M.L., D.A.R.R.; data analysis, V.J.P.B., L.D.C.G., J.C.G.S., Y.C.G.M., M.E.M.L., D.A.R.R.; research, V.J.P.B., L.D.C.G., J.C.G.S., Y.C.G.M., M.E.M.L., D.A.R.R.; methodology, V.J.P.B.; project management, V.J.P.B.; supervision, V.J.P.B.; writing of the original draft, L.D.C.G., J.C.G.S., Y.C.G.M., M.E.M.L., D.A.R.R.; proofreading and editing, V.J.P.B., A.M.M-R.

REFERENCES

- ÁLVAREZ, E.; DUQUE, A.; SALDARRIAGA, J.; CABRERA, K.; DE LAS SALAS, G.; DEL VALLE, I.; LEMA, A.; MORENO, F.; ORREGO, S.; RODRÍGUEZ, L. 2012. Tree above-ground biomass allometries for carbon stocks estimation in the natural forests of Colombia. *Forest Ecology and Management*. 267:297-308. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.12.013>
- ARYAL, K.; OJHA, B.; MARASENI, T. 2021. Perceived importance and economic valuation of ecosystem services in Ghodaghodi wetland of Nepal. *Land Use Policy*. 106:105450. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105450>

- AZADI, H.; VAN PASSEL, S.; COOLS, J. 2021. Rapid economic valuation of ecosystem services in man and biosphere reserves in Africa: A review. *Global Ecology and Conservation*. 28:e01697. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2021.e01697>
- BADAMFIROOZ, J.; MOUSAZADEH, R.; SARKHEIL, H. 2021. A proposed framework for economic valuation and assessment of damages cost to national wetlands ecosystem services using the benefit-transfer approach. *Environmental Challenges*. 5:1000303. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100303>
- BASU, T.; DAS, A.; DAS, K.; PEREIRA, P. 2023. Urban expansion induced loss of natural vegetation cover and ecosystem services values: A scenario-based study in the siliguri municipal corporation (Gateway of North-East India). *Land Use Policy*. 132:106838. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2023.106838>
- BATEMAN, I.; MACE, G.; FEZZI, C.; ATKINSON, G.; TURNER, K. 2011. Economic analysis for ecosystem services assessment. *Environmental Resources Economics*. 48:177-218. <https://doi.org/10.1007/s10640-010-9418-x>
- BAX, V.; VAN DE LAGEWEG, W.; TERPSTRA, T.; BUIJS, J.M.; DE REUS, K.; DE GROOT, F.; VAN SCHAIK, R.; HABTE, M.; SCHRAM, J.; HOOGENBOOM, T. 2023. The impacts of coastal realignment on the availability of ecosystem services: gains, losses, and trade-offs from local community perspective. *Journal of Environmental Management*. 345:118675. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118675>
- BERA, D.; CHATTERJEE, N.; GHOSH, S.; DINDA, S.; BERA, S.; MANDAL, M. 2022. Assessment of forest cover loss and impacts on ecosystem services: Coupling of remote sensing data and people's perception in the dry deciduous forest of West Bengal, India. *Journal of Cleaner Production*. 356:131763. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131763>
- BLANCO-LIBREROS, J.; ORTÍZ-ACEVEDO, L.; URREGO, L. 2015. Reservorios de biomasa aérea y de carbono en los manglares del golfo de Urabá (Caribe colombiano). *Actualidades Biológicas*. 37(103):131-141. <https://doi.org/10.17533/udea.acbi.328993>
- CARBON CREDITS. 2023. Live carbon prices today. Carbon Credits. Disponible desde Internet en: <https://carboncredits.com/carbon-prices-today/>
- CETIN, N.; BOURGET, G.; TEZER, A. 2021. Travel-cost method for assessing the monetary value of recreational services in the Ömerli Catchment. *Ecological Economics*. 190:107192. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2021.107192>
- CONSTANZA, R. 2016. Ecosystem services in theory and practice. En: Potschin, M., Haines-Young, R., Fish, R., Turner, R. (Eds.). *Routledge handbook of ecosystem services*. Routledge, London-New York. 658p.
- DE GROOT, R.; FISHER, B.; CHRISTIE, M.; ARONSON, J.; BRAAT, L.; GOWDY, J.; HAINES-YOUNG, R.; MALTBY, E.; AUDE, N.; POLASKY, S.; PORTELA, R.; RING, I. 2010. Integrating the ecological and economic dimensions in biodiversity and ecosystem services valuation. En: Kumar, P. (Ed.). *TEEB The economics of ecosystem and biodiversity ecological and economic foundations*. Earthscan, UK-USA. p.9-37.
- DREW-SMYTHE, J.; DAVILA, Y.; MCLEAN, C.; HINGEE, M.; MURRAY, M.; WEBB, J.; KRIX, D.; MURRAY, B. 2023. Community perceptions of ecosystem services and disservices linked to urban tree planting. *Urban Forestry & Urban Greening*. 82:127870. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2023.127870>
- FISHER, B.; BATEMAN, I.; TURNER, K. 2011. Valuing ecosystem services: Benefits, values, space and time. The United Nations Environment Programme, Kenya. 11p.
- FLORES DE MELO, A.; NOGUEIRA-LIMA, A.; NEVES-D'OLIVEIRA, M.; DOS SANTOS, J.; BROWN, I.; FERREIRA DO AMARAL, E.; SOUZA DA SILVA, S.; OLIVEIRA, I.; BARBOSA DE CAMARGO, P.; HIGUCHI, N. 2024. To improve of neotropical forest carbon stocks more direct measurements are needed: An example from the Southwestern Amazon. *Forest Ecology and Management*. 570:122195. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.122195>
- FU, B.; XU, P.; WANG, Y.; YAN, K.; CHAUDHARY, S. 2018. Assessment of the ecosystem services provided by ponds in hilly areas. *Science of the Total Environment*. 642:979-987. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.138>
- GUTIÉRREZ, E.; MORENO, R.; VILLOTA, N. 2013. Guía de cubicación de madera. Proyecto posicionamiento de la gobernanza forestal en Colombia. Disponible desde Internet en: <https://www.cvc.gov.co/sites/default/files/2020-04/07.%20GUIA%20DE%20CUBICACION%20DE%20MADERA.pdf>
- HAGEDORN, K. 2008. Particular requirements for institutional analysis in nature-related sectors. *European Review of Agricultural Economics*. 3(35):357-384. <https://doi.org/10.1093/erae/jbn019>
- HATAN, S.; FLEISCHER, A.; TCHETCHIK, A. 2021. Economic valuation of cultural ecosystem services: The case of landscape aesthetics in the agritourism market. *Ecological Economics*. 184:1-11. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2021.107005>

- HERNÁNDEZ-BLANCO, M.; CONSTANZA, R.; CIFUENTES-JARA, M. 2021. Economic valuation of the ecosystem services provided by the mangroves of the Gulf of Nicoya using a hybrid methodology. *Ecosystem Services*. 49:101258.. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2021.101258>
- HU, X.; LI, Z.; CHEN, J.; NIE, X.; LIU, J.; WANG, L.; NING, K. 2021. Carbon sequestration benefits of the grain for Green Program in the hilly red soil region of southern China. *International Soil and Water Conservation Research*. 9:271-278. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2020.11.005>
- INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES - IDEAM. 2018. Características climatológicas de ciudades principales y municipios turísticos. Disponible desde Internet en: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21789/1Sitios+turisticos2.pdf/cd4106e9-d608-4c29-91cc-16bee9151ddd>
- JUUTINEN, A.; IMMERZEEL, B.; POUTA, E.; LANKIA, T.; ARTELL, J.; TOLVANEN, A.; AHTIAINEN, H.; VERMAAT, J. 2022. A comparative analysis of the value of recreation in six contrasting Nordic landscapes using the travel cost method. *Journal of Outdoor Recreation and Tourism*. 39:1-13. <https://doi.org/10.1016/j.jort.2022.100528>
- KADER BABA, C.; HACK, J. 2019. Economic valuation of ecosystem services for the sustainable management of agropastoral dams. A case study of the Sakabansi dam, northern Benin. *Ecological Indicators*. 107:105648. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105648>
- LI, J.; DONG, S.; LI, Y.; WANG, Y.; LI, Z. 2023. Terrestrial transects study on pattern and driving mechanism of ecosystem services in the China-Mongolia-Russia economic corridor. *Science of the Total Environment*. 884:163880. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163880>
- MAYER, M.; WOLTERING, M. 2018. Assessing and valuing the recreational ecosystem services of Germany's national Parks using travel cost models. *Ecosystem Services*. 31:371-386. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.12.009>
- MEDINA ARROYO, H.; MARTÍNEZ GUARDÍA, M.; BARRIOS MATURANA, F.; BOLILLA FLÓREZ, A. 2007. Determinación del porcentaje de desperdicio en las labores de aprovechamiento forestal en un bosque pluvial tropical en el municipio de medio sal juan, Choco, Colombia. *NOVA*. 5(8):154-160.
- NYELELE, C.; KESKE, C.; CHUNG, M.; GUO, H.; EGOH, B. 2023. Using social media data to estimate recreational travel costs: A case study from California. *Ecological Indicators*. 154:110638. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110638>
- PALACIOS, V. 2021. The agroforestry systems of the Camëntsá and Inga indigenous communities in the Sibundoy Valley, Colombia. Socioeconomic and environmental assessment for ecosystem services valuation. Verlag Dr. Köster, Berlín, Alemania. 189p.
- PHILLIPS, J.F.; DUQUE, A.J.; YEPES, A.P.; CABRERA, K.R.; GARCÍA, M.C.; NAVARRETE, D.A.; ÁLVAREZ, E.; CÁRDENAS, D. 2011. Estimación de las reservas actuales (2010) de carbono almacenadas en la biomasa aérea en bosques naturales de Colombia. Estratificación, alometría y métodos analíticos. Instituto de Hidrología, Meteorología, y Estudios Ambientales -IDEAM, Bogotá D.C., Colombia. 68 p.
- RED FORESTAL. 2023. Valor forestal. Disponible desde Internet en: <https://redforestal.com/es/publicaciones>
- SAARIKOSKI, H.; AAPALA, K.; ARTELL, J.; GRAMMATIKOPOULOU, I.; HJERPPE, T.; LEHTORANTA, V.; MUSTAJOKI, J.; POUTA, E.; PRIMMER, E.; VATN, A. 2022. Multimethod valuation of peatland ecosystem services: Combining choice experiment, multicriteria decision analysis and deliberative valuation. *Ecosystem Services*. 57:101471. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2022.101471>
- SHRESTHA, K.; SHAKYA, B.; ADHIKARI, B.; NEPAL, M.; SHAOLIANG, Y. 2023. Ecosystem services valuation for conservation and development decisions: A review of valuation studies and tools in the Far Eastern Himalaya. *Ecosystem Services*. 61:101526. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2023.101526>
- TORRES-TORRES, J.; MENA-MOSQUERA, V.; ÁLVAREZ-DAVILA, E. 2017. Carbono aéreo almacenado en tres bosques del Jardín Botánico del Pacífico, Chocó, Colombia. *Entramado*. 13(1):25110. <https://doi.org/10.18041/entramado.2017v13n1.25110>
- VERMA, M.; NEGANDHI, D.; KHANNA, C.; EDGAONKAR, A.; DAVID, A.; KADEKODI, G.; CONSTANZA, R.; GOPAL, R.; BONAL, B.; YADAV, S.; KUMAR, S. 2017. Making the hidden visible: Economic valuation of tiger reserves in India. *Ecosystem Services*. 26:236-244. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.05.006>
- WANG, C.; HOU, Y.; ZHANG, J.; CHEN, W. 2023. Assessing the groundwater loss risk in Beijing based on ecosystem services supply and demand and the influencing factors. *Science of the Total Environment*. 872:162255. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162255>
- XU, S.; HE, X. 2022. Estimating the recreational value of a coastal wetland park: Application of the choice

- experiment method and travel cost Interval analysis. *Journal of Environmental Management*. 304:114225. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114225>
- YEPES, A.P.; NAVARRETE, D.A.; DUQUE, A.J.; PHILLIPS, J.F.; CABRERA, K.R.; ÁLVAREZ, E.; GARCÍA, M.C.; ORDOÑEZ, M.F. 2011. Protocolo para la estimación nacional y subnacional de biomasa - carbono en Colombia. Instituto de Hidrología, Meteorología, y Estudios Ambientales-IDEAM-. Bogotá D.C., Colombia. 162p.
- ZHANG, Q.; YIN, Z.; LU, X.; GONG, J.; LEI, Y.; CAI, B.; CAI, C.; CHAI, Q.; CHEN, H.; DAI, H.; DONG, Z.; GENG, G.; GUAN, D.; HU, J.; HUANG, C.; KANG, J.; LI, T.; LI, W.; LIN, Y.; LIU, J.; HE, K. 2023. Synergetic roadmap of carbon neutrality and clean air for China. *Environmental Science and Ecotechnology*. 16:100280. <https://doi.org/10.1016/j.es.2023.100280>
- ZRELLI, R.; HCINE, A.; YACOUBI, L.; ROA-URETA, R.; GALLAI, N.; CASTET, S.; GRÉGOIRE, M.; COURJAULT-RADÉ, P.; RABAOUI, L. 2023. Economic losses related to the reduction of *Posidonia* ecosystem services in the Gulf of Gabes (Southern Mediterranean Sea). *Marine Pollution Bulletin*. 186:114418. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.114418>

Caracterización de la lluvia y el banco de semillas en un relicto de bosque inundable urbano en proceso de restauración ecológica

Characterization of rainfall and the seed bank in a relict urban floodplain forest in the process of ecological restoration

Bibiana Pérez-Suárez¹ 

¹Jardín Botánico José Celestino Mutis. Bogotá D.C., Colombia; email: bsperez@jbb.gov.co

Cómo citar: Pérez-Suárez, B. 2024. Caracterización de la lluvia y el banco de semillas en un relicto de bosque inundable urbano en proceso de restauración ecológica. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 27(2):e2396. <http://doi.org/10.31910/rudca.v27.n2.2024.2396>

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 3 de 2024

Aceptado: septiembre 9 de 2024

Editado por: Sandra Quijas Fonseca

RESUMEN

En ecosistemas conservados, la regeneración natural se inicia a partir de la germinación de especies que se localizan en el banco de semillas; esto no ocurre en áreas que han sido fuertemente degradadas, donde el banco de semillas se encuentra empobrecido, por lo tanto, la presente investigación buscó determinar la contribución de la lluvia y el banco de semillas, en el proceso de restauración ecológica en el Bosque Las Mercedes, importante relicto de bosque, ubicado al noroccidente de la ciudad de Bogotá. Se realizó la caracterización de la vegetación en la cobertura de bosque y de pastizales misceláneos, la recolección de muestras de suelo y la ubicación de trampas de semillas, en 31 transectos, 16 en bosque y 15 en pastizales, con diferentes años de intervención. Como resultado, se encontró que las mayores abundancias obtenidas en la germinación del banco de semillas corresponden a especies herbáceas, pero, también, se presentan algunas especies nativas dinamizadoras de la sucesión natural, tanto en bosque como en los pastizales misceláneos, en estos últimos, con abundancias menores. Debido a los resultados obtenidos, se considera viable emplear el estudio de la lluvia y el banco de semillas como indicador del proceso de restauración ecológica en las coberturas vegetales, con diferentes años de intervención, en el Bosque Las Mercedes, ya que se logró establecer que las áreas, que han sido objeto de acciones de restauración ecológica, desde hace más tiempo, muestran algunas semejanzas con la trayectoria sucesional más avanzada que, en este caso, corresponde a bosque denso.

Palabras clave: Áreas degradadas; Áreas verdes urbanas; Especies pioneras herbáceas; Regeneración natural; Restauración ecológica asistida.

ABSTRACT

In conserved ecosystems, natural regeneration begins from the germination of species that are in the seed bank. Natural regeneration does not occur in areas that have been heavily degraded, where the seed bank is impoverished. Therefore, the present research sought to determine the contribution of rain and the seed bank in the ecological restoration process in Las Mercedes Forest. The characterization of the vegetation was carried out in the forest and miscellaneous grassland cover, the collection of soil samples, and the location of seed traps in 31 transects, 16 in the forest, and 15 in grasslands with different years of intervention. As a result, it was found that the highest abundances obtained in the germination of the seed bank correspond to herbaceous species; nevertheless, some native species that stimulate natural succession are also present, both in forest and in miscellaneous grasslands, in the latter with lower abundances. Due to the results obtained, it is considered viable to use the study of rainfall and the seed bank as an indicator of the ecological restoration process in the vegetation covers with different years of intervention in the Las Mercedes Forest since it was possible to establish that the areas that have been the subject of ecological restoration actions for a longer time show some similarities with the most advanced successional trajectory, which in this case corresponds to dense forest.

Keywords: Assisted ecological restoration; Degraded areas; Herbaceous pioneer species; Natural regeneration; Urban green areas.

INTRODUCCIÓN

Los bosques periurbanos, frecuentemente, son amenazados por diversas causas, entre las más importantes, los procesos de migración humana, el crecimiento demográfico, el aumento de oferta inmobiliaria, la construcción de vías de acceso, el turismo, entre otros. Estas modificaciones resultan prácticamente irreversibles, por lo que son una amenaza sobre las escasas áreas verdes urbanas, suprimiendo por completo funciones ecológicas, como la regulación climática, la purificación del aire y agua y, en el caso de bosque inundables, los procesos hidrológicos de regulación y almacenamiento del recurso hídrico (Seto *et al.* 2011; Moschella, 2023; Cavallero *et al.* 2024). Teniendo en cuenta lo anterior, se considera prioritario realizar esfuerzos para conservar, recuperar y restaurar estos ecosistemas estratégicos para la supervivencia de las grandes ciudades (Moschella, 2023).

Garwood (1989) afirma que los dos mecanismos principales que contribuyen a la regeneración de los ecosistemas son el banco de semillas y las semillas recientemente dispersadas; sin embargo, considera que es más importante la contribución del banco de semillas. Los bancos de semillas pueden ser transitorios, es decir, aquellos donde las semillas permanecen viables por un periodo aproximado de un año o persistentes, en donde las semillas permanecen viables durante años.

La recuperación de la vegetación inicia con la expresión del banco de semillas, proceso que se encuentra relacionado con factores bióticos, abióticos y procesos ecológicos; entre los factores bióticos más sobresalientes y prácticamente condicionantes es la existencia de propágulos en el medio, como agentes dinamizadores naturales de la sucesión (Hill *et al.* 2001; Bedoya-Patiño *et al.* 2010; Muñoz, 2017).

La regeneración natural después de un disturbio requiere de la presencia de semillas o propágulos en el medio; en este proceso se presentan fases, como la producción y dispersión de semillas, la germinación y establecimiento de las plántulas. Se considera que los estados más vulnerables durante este ciclo son las semillas y las plántulas, debido a que las condiciones bióticas y abióticas en el ecosistema pueden generar alta mortalidad de estas (Norden, 2014).

La dispersión de las semillas es una estrategia de las plantas para colonizar nuevos lugares donde las condiciones sean adecuadas para las especies; sin embargo, esto no siempre ocurre, muchas veces, las semillas no encuentran las condiciones necesarias para la germinación y el establecimiento (Norden, 2014). Los estudios sobre lluvia de semillas brindan información sobre cómo el bosque responderá a ciertos cambios ambientales, utilizando su propio potencial regenerativo (Calegari *et al.* 2013).

En áreas degradadas, los bancos de semillas se encuentran empobrecidos o ausentes, según el grado de deterioro y cuando existen están dominados por especies pioneras herbáceas, dando como resultado una lenta recuperación y una baja diversidad del ecosistema (Vargas *et al.* 2009; Muñoz *et al.* 2017, Foresto *et al.* 2021).

Cuando esto ocurre, es necesario iniciar procesos de restauración ecológica asistida, donde se incorporen al medio especies nativas, que dinamicen el proceso de recuperación.

En este sentido, en áreas de interés donde se requiera iniciar acciones de manejo, es muy importante conocer cómo ocurre la regeneración natural de las especies y sus procesos ecológicos asociados, con el fin de contar con herramientas que permitan diseñar estrategias de manejo sostenible y de restauración ecológica más eficientes (Harms & Paine, 2003; Martins, 2016; Muñoz *et al.* 2017; Poorter *et al.* 2023).

Teniendo en cuenta lo anterior, el Jardín Botánico de Bogotá inició acciones de restauración ecológica en el Bosque las Mercedes, desde el 2011. Esta área es un importante relicto de bosque inundable, que hace parte de la estructura ecológica principal de Bogotá; por lo tanto, esta investigación buscó analizar la composición, la abundancia, la densidad, la riqueza y la diversidad de la lluvia y el banco de semillas, entre coberturas vegetales con diferentes años de intervención y, de esta manera, proporcionar información sobre el avance en el proceso de restauración ecológica en el Bosque Las Mercedes (Figura 1), ya que estudios han demostrado que el conocimiento del banco y la lluvia de semillas de un área permite enterarse del estado de sucesión, el grado de perturbación y las posibles fuentes de propágulos (Padilla, 2008; Solorza-Bejarano, 2012; Fernández *et al.* 2016; Solorza-Bejarano, 2017).

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio. El Bosque Las Mercedes se encuentra ubicado en la localidad de Suba (Figura 1a), entre las coordenadas N 4°46', W 74°05' a 2.554 m s.n.m.; se considera un ecosistema de gran importancia para la ciudad, debido a que es reconocido como el último relicto de Bosque andino montano bajo (bh-MB), de planicie lacustre inundable y valle aluvial del río Bogotá. A pesar de su importancia ecológica, el área se ha enfrentado a una continua degradación antrópica, debido a las actividades productivas realizadas, presentando disturbios, como la fragmentación, la pérdida de biodiversidad y la invasión por especies arvenses trepadoras; por lo anterior, fue establecida como un Área Piloto de Investigación en Restauración Ecológica APIRE para el Jardín Botánico de Bogotá (JBB) (Pérez, 2016).

Las acciones de restauración ecológica han sido implementadas por el JBB desde el 2012 y han consistido en la erradicación de especies vegetales invasoras, oportunistas y trepadoras agresivas; el enriquecimiento del sotobosque con la adición de especies nativas; la plantación de especies pioneras arbóreas y arbustivas en áreas de pastizal y la formación de corredores ecológicos en zonas invadidas por pastizales de *Cenchrus clandestinus* (Hochst. ex Chiov.) Morrone (Pérez, 2016; Pérez, 2020).

Dentro del área, denominada Bosque Las Mercedes, el JBB definió una zonificación, de acuerdo con el estado de su vegetación, encontrándose la cobertura de bosque, que se refiere a la zona mejor conservada dentro del ecosistema (Tabla 1); sin embargo, posee

diferentes tensionantes que han sido abordados. En esta cobertura se han identificado tres subdivisiones: Bosque denso (BD), Bosque abierto (BA) y Bosque Inundable (BI), en donde se ha realizado el control de especies, como *Rubus bogotensis* Kunth, *Muehlenbeckia tamnifolia* (Kunth) Meisn., *Salpichroa tristis* Walp., *Cucurbita ficifolia* Bouché, entre otras y la adición de especies vegetales nativas, propias del ecosistema de bosque inundable (Pérez, 2016; Pérez, 2020).

La cobertura de Pastizales Misceláneos (PMI) se encuentra alrededor del bosque, presenta especies exóticas e invasoras, en su mayoría herbáceas, pertenecientes a la familia Poacea, como *C. clandestinus*

y *Holcus lanatus* L., especies nativas que han sido plantadas en los procesos de restauración ecológica y otras que han arribado, provenientes del bosque o de otras áreas anexas (Tabla 1). Esta cobertura fue subdividida teniendo en cuenta el periodo de intervención: PMI01 (en esta área se realizó la intervención en enero del 2021), PMI3A (intervención en febrero del 2020) y PMI3B (intervención desde junio del 2017) (Figura1b).

La investigación se desarrolló evaluando la lluvia de semillas y el banco de semillas; asimismo, se realizó la caracterización de la vegetación en pie, con el objetivo de identificar su correspondencia, similitudes o diferencias.

Tabla 1. Características para las zonas estudiadas en el Bosque Las Mercedes.

	Bosque (B)			Pastizales misceláneos (PMI)		
	Denso (BD)	Abierto (BA)	Inundable (BI)	PMI01	PMI3A	PMI3B
Área (ha)	6,83	1,81	1,47	1,08	1,41	1,25
Inicio intervención	feb-12	feb-12	feb-12	ene-21	feb-20	jun-17

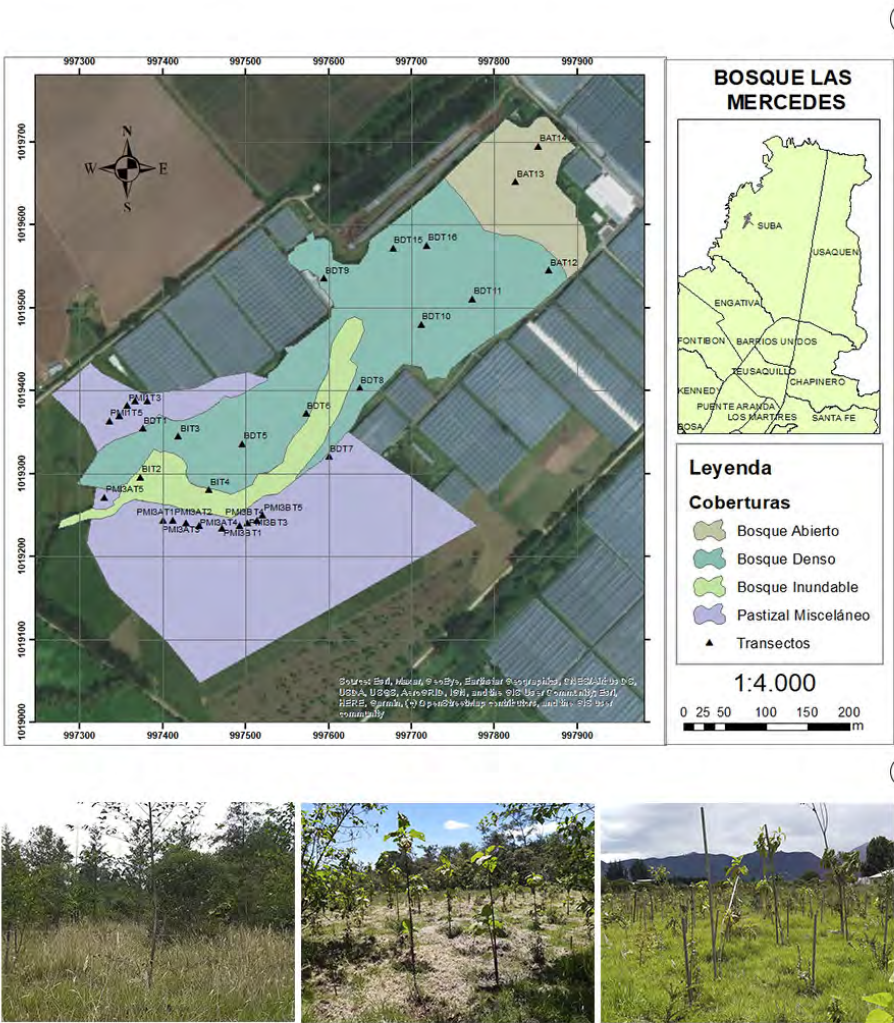


Figura 1. a) Mapa ubicación área de estudio Bosque Las Mercedes. b) Fotografías Pastizales de izquierda a derecha: PMI3B- Pastizal Misceláneo (intervención desde 2017); PMI3A - Pastizal Misceláneo (intervención desde marzo de 2020) y PMI1- Pastizal Misceláneo (intervención desde enero de 2021).

Caracterización vegetal: se llevó a cabo por medio de 31 transectos de 25 x 4 m (16 en bosque y 15 en pastizal), con el fin de conocer la vegetación en pie, tanto adultos como los individuos en proceso de desarrollo; se registraron todos los individuos de porte arbóreo y arbustivo presentes, con un DAP $\geq$ a 2,5 cm (Campo Kurmen, 2010); para las herbáceas, se registró el porcentaje de cobertura y para las plántulas reclutadas de especies de hábito arbustivo y arbóreo fueron contabilizadas y registradas. Asimismo, sobre estos transectos, se tomaron las muestras para el banco de semillas y se ubicaron las trampas para la evaluación de la lluvia de semillas.

Banco de semillas germinable – BSG: la evaluación se realizó con la recolección de 310 submuestras de suelo de 5 cm de altura x 5 cm de diámetro, en mayo del 2021; en cada transecto, se tomaron 10 submuestras, para conformar dos muestras por transecto, para un total de 62 muestras compuestas. Estas se secaron parcialmente a temperatura ambiente; se eliminaron, de modo manual, los restos de raíces, hojas y piedras y se dispusieron uniformemente, en bandejas de germinación plásticas, ubicadas dentro de un microinvernadero, localizado al sur de Bogotá, donde se presentó una temperatura interior promedio de 25 °C y humedad del 90 %; con frecuencia, se suministró riego a capacidad de campo. El análisis de la densidad y composición del banco de semillas se realizó por el método de germinación directa, durante un periodo de cinco meses, donde cada 15 días se registró el número de plántulas por morfoespecie y en la identificación se trató, en lo posible, de llegar hasta especie (Moscoso Marín & Díez Gómez, 2005).

Lluvia de semillas: se evaluó por medio de trampas, en forma de cono invertido, con un diámetro de 40 cm; la boca de la trampa fue ubicada a un metro de altura. El muestreo de la lluvia de semillas se realizó mensualmente, durante junio y julio del 2021; las semillas de cada trampa se recolectaron en bolsas plásticas, se llevaron al laboratorio de semillas de la subdirección científica del JBB para ser secadas a temperatura ambiente, procesadas y observadas bajo el estereoscopio. La identificación se realizó con la ayuda de ejemplares de herbarios, carpotecas y comparación con semillas recolectadas en la zona; los frutos recolectados en las trampas se abrieron para contabilizar sus semillas.

Dentro de las tres coberturas localizadas en el bosque se instaló una trampa ubicada en la mitad del transecto (a 12,5 m), para un total de 16 trampas; en los pastizales misceláneos se evaluó la lluvia de semillas a diferentes distancias del borde del bosque, por lo tanto, en cada transecto se ubicaron tres trampas de semillas: la primera, a los 6 m de distancia del borde; la segunda, a los 12 m y la tercera, a los 24 m, con el objetivo de conocer el aporte de la lluvia de semillas provenientes desde el bosque, a diferentes distancias en los pastizales circundantes (Tercero-Bucardo *et al.* 2010).

Análisis de los datos: la densidad de las semillas se calculó por metro cuadrado; la diversidad se evaluó a partir de los índices de Shannon y Simpson y la riqueza, a partir del índice de Margalef. En el análisis de diversidad Beta para la comparación entre los bancos, la lluvia de semillas y la vegetación en pie dentro de las coberturas estudiadas, se empleó el método ordenación de escalamiento

multidimensional no métrico con distancia de Bray - Curtis, el cual, no solo tiene en cuenta las especies, sino que, además, incluye las abundancias de forma ponderada, es decir, esta medida no considera las ausencias compartidas como similares (Rojas-Jiménez, 2022). Finalmente, para la comparación entre los resultados obtenidos entre las diferentes coberturas y mecanismos se realizó el análisis de componentes principales con el programa estadístico Past (Hammer *et al.* 2001), donde se comparó las especies y sus abundancias en cada mecanismo y cobertura.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Composición de la vegetación en pie. Para el total del área de estudio se encontraron 5.908 individuos de 115 especies, pertenecientes a 100 géneros y 51 familias botánicas (Tabla 3). La familia con mayor abundancia de individuos fue la Solanaceae, seguido de Asteraceae y Poaceae. Las especies con mayor abundancia fueron: *Solanum oblongifolium* Humb. & Bonpl. ex Dunal, *C. clandestinus*, *Smallanthus pyramidalis* (Triana) H. Rob., *Vallea stipularis* ex L. fil. y *R. bogotensis*.

En la cobertura de bosque se obtuvo 4.393 individuos de 96 especies, pertenecientes a 87 géneros y 49 familias botánicas. La cantidad de individuos obtenidos en esta cobertura corresponde al 79 % del total de los individuos registrados; las familias más representativas de la cobertura fueron: Solanaceae, Asteraceae, Rosaceae y Elaeocarpaceae. La mayor parte de las especies registradas corresponde a arbustos 40,5 % y árboles 27,4 %; las trepadoras representaron el 16,4 % y las herbáceas y gramíneas 15,7 %. En cuanto a las especies, se observó que las mayores abundancias las presentaron *S. oblongifolium*, *R. bogotensis*, *S. pyramidalis*, *V. stipularis* y *Bocconia frutescens* L.

En la cobertura de pastizal misceláneo se encontraron 1.515 individuos de 76 especies, distribuidas en 67 géneros y 37 familias botánicas; las familias con mayor representatividad fueron Poaceae, Asteraceae, Fabaceae y Araliaceae. La mayor abundancia la presentaron las especies herbáceas, con un 31,4 % y gramíneas, con 30,8 %; asimismo, los árboles representaron 23,2 y los arbustos 9,9 % de la muestra. Por último, solo el 4,7 %, lo presentaron las trepadoras.

Las especies herbáceas más frecuentes fueron *C. clandestinus*, *Hydrocotyle andina* Cuatrec, *Trifolium pratense* L., *Taraxacum officinale* Weber ex F. H. Wigg. y *Holcus lanatus* L., entre otras y en cuanto a las especies más abundantes del componente arbóreo y arbustivo, se encontraron *S. pyramidalis*, *V. stipularis*, *Myrcianthes leucoxyla* (Ortega) Mc Vaughn y *Abatia parviflora* Ruiz & Pav.

Para la cobertura de Bosque se observó que *R. bogotensis* fue la segunda especie más abundante; se trata de una especie colonizadora agresiva (Pérez, 2020; Muñoz, 2022), que ha sido identificada como un tensionante en el Bosque Las Mercedes, al competir por luz con otras especies, tanto arbóreas como arbustivas (Pérez, 2016; Pérez, 2020; Muñoz, 2022). En este sentido, los resultados obtenidos en la presente investigación difieren con lo encontrado por Pérez (2020),

quien observó que, a raíz del control de *R. bogotensis*, se había logrado disminuir la dominancia de la especie en las coberturas de Bosque. Por otra parte, para esta misma cobertura, la alta abundancia de *S. oblongifolium* podría ser un factor tensionante para la regeneración de otras especies nativas, ya que se encuentra compitiendo por espacio y luz en el sotobosque.

En el caso de las especies arbóreas y arbustivas encontradas en los pastizales misceláneos corresponden a especies que han sido incorporadas en los procesos de restauración ecológica desarrollados (Pérez, 2016) y no por procesos de regeneración natural, es decir, la dominancia de las gramíneas invasoras no ha permitido el establecimiento de nuevos individuos de las especies nativas plantadas o provenientes del bosque.

De acuerdo con Mora-Donjuán *et al.* (2017), los índices de diversidad para la vegetación en pie mostraron que para Margalef la riqueza fue alta para todas las coberturas, al encontrarse valores cercanos a 5 o superiores, especialmente, para BD, PMI3B y PMI1 y el índice de Shannon (H) fue mayor en el sector de BA; sin embargo, este valor se considera como diversidad media, debido a que se reporta un valor entre 2 - 3 (Tabla 2). Los valores obtenidos para este índice muestran que algunas pocas especies presentan abundancias mayores al promedio en todas las coberturas. Para el índice de Simpson (1-D), todas las áreas presentaron una alta diversidad, con valores cercanos a 1 (Martínez, 2023). En cuanto a la densidad de individuos por hectárea fue mucho mayor en la cobertura de BD, seguido por BI y las menores densidades se presentaron en las dos zonas más recientemente intervenidas.

En el análisis de diversidad beta para la comparación entre las coberturas y los sectores para la vegetación en pie, el índice de Bray – Curtis mostró que el bosque y los pastizales misceláneos son diferentes (Figura 2a), incluso, dentro de la cobertura de bosque, se observó que BA presenta un comportamiento diferente; se encontraron algunas semejanzas entre BD y BI. También fue visible que los transectos BDT7 y BIT2 poseen una alta semejanza con la vegetación de los pastizales; dentro de estos últimos, se apreciaron diferencias significativas entre PMI1 comparado con PMI3A y PMI3B. En general, las coberturas tienen media similitud en cuanto a la composición y abundancia de especies ($R=0,70$), indicando que las zonas son diferentes y de acuerdo con el análisis estadístico no paramétrico de una sola vía ANOSIM, se obtuvo diferencias significativas entre las coberturas analizadas ($P= 0,0001$).

Composición del banco de semillas. El seguimiento al banco de semillas germinable se realizó durante 5 meses y se obtuvo un total de 6.208 plántulas de 78 morfoespecies, de las cuales, se logró identificar 66 especies pertenecientes a 28 familias botánicas (Tabla 3). En la cobertura de bosque se obtuvo 4.128 plántulas y en pastizal misceláneo 2.080; las primeras especies en germinar pertenecieron al estrato herbáceo de las familias botánicas Solanaceae, Rubiaceae, Asteraceae y Poaceae.

Las semillas germinadas en la cobertura de bosque pertenecen a 65 especies de 26 familias botánicas; las más abundantes fueron

Solanaceae, Rubiaceae y Asteraceae. En estas tres familias se encuentra el 84 % de las semillas germinadas; la mayor parte de las semillas germinadas pertenece al estrato herbáceo, con un 81,7 %, seguido del estrato arbóreo, con 6,7 % y arbustivo, con 5,9 %; las especies trepadoras y gramíneas, con un 4,2 % y 1,5 %, respectivamente.

Las especies más frecuentes fueron: *Oldenlandia corymbosa* L., *Solanum nigrescens* M. Martens & Galeotti, *Solanum americanum* Mill., *Erigeron bonariensis* L., *Physalis peruviana* L., *R. bogotensis*, *V. crassiramea*, *S. pyramidalis* y *S. oblongifolium*. Esto coincide con lo reportado por Gioria & Pyšek (2016) y Abreu *et al.* (2021), quienes observaron que los bancos de semillas estaban compuestos, en su mayoría, por especies herbáceas de sucesión temprana.

En la cobertura de pastizal misceláneo se observaron 58 morfoespecies, correspondientes a 25 familias botánicas; las familias más representativas en esta cobertura fueron Rubiaceae, Asteraceae, Poaceae y Solanaceae. En estas 4 familias se encuentra representado el 78 % de las semillas germinadas; la mayor abundancia de semillas germinadas corresponde al estrato herbáceo, con el 47,3 %; las gramíneas, con 20,22 %; las trepadoras, con 17 %; los árboles, con un 10,4 % y, finalmente los arbustos, con un 5,1 %.

Las especies más abundantes en orden fueron: *Galium murale* (L.) All., *O. corymbosa*, *H. lanatus*, *S. nigrescens*, *V. crassiramea*, *T. pratense*, *C. clandestinus* y *Baccharis latifolia* (Ruiz & Pav.) Pers. Las dos primeras especies de la familia Rubiaceae han sido consideradas invasoras en otros países (Causton *et al.* 2020; Pauchard *et al.* 2020) y *H. lanatus* es considerada invasora para Colombia (Díaz-Espinosa *et al.* 2012; Mora-Goyes & Barrera-Cataño, 2015).

En cuanto a las especies invasoras o colonizadoras agresivas, se encontró que, en el banco de semillas, una especie muy abundante fue *R. bogotensis*; también se observó *Muehlenbeckia tamnifolia* (Kunth) Meisn., en menor proporción. Estas dos especies se encontraron, tanto en bosque como en pastizales, asociadas, principalmente, a BD, BI, PMI3A y PMI3B. Por otra parte, una especie muy abundante en todas las coberturas, en particular, en BD y BA, fue el *S. oblongifolium* y en pastizales se observó únicamente de forma abundante en PMI3A.

En este sentido, Gioria & Pyšek (2016) y Velosa *et al.* (2018) observaron que las especies invasoras tienen un efecto negativo sobre la densidad y la riqueza de especies nativas en el banco de semillas, ya que sugieren que la biomasa producida por estas impide la llegada de semillas de especies nativas de comunidades vecinas al suelo. En efecto, las mayores densidades de semillas se presentaron en BA y en PMI3B (Tabla 2); sin embargo, esto se debe a la abundancia de las especies de la familia Rubiaceae. Asimismo, la menor densidad de semillas se presentó en PMI1 y PMI3A, que corresponde a las zonas más recientemente intervenidas con acciones de restauración ecológica, coincidiendo con Vargas *et al.* (2009), Muñoz *et al.* (2017) y Foresto *et al.* (2021), quienes afirman que en áreas, fuertemente degradadas, los bancos de semillas se encuentran empobrecidos o ausentes.

Las coberturas PMI01 y BA presentaron los menores valores para los índices de Shannon y Simpson (Tabla 2); sin embargo, corresponde a una diversidad intermedia (Mora-Donjuán *et al.* 2017; Martínez, 2023). Asimismo, para todas las coberturas, estos índices presentaron valores intermedios; en el caso de BA, obtuvo la mayor densidad de semillas germinadas, pero estas correspondían a pocas especies, como *O. corymbosa*, por esta razón, presentó el menor valor para el índice de Simpson. Por otra parte, las coberturas que mostraron una mayor riqueza y diversidad son las coberturas de PMI3B, BD y BI, donde el índice de Margalef y el índice de Simpson mostraron mayor valor; asimismo, presentaron una alta densidad de semillas. En este sentido, Ma *et al.* (2019) encontraron que los bancos de semillas persistentes de alta diversidad y densidad son un indicador importante de la alta capacidad de recuperación del ecosistema después de un disturbio.

En el análisis de diversidad Beta se observó que dentro del bosque se presentan diferencias marcadas entre las coberturas BD y BA; en la cobertura pastizal misceláneo se observaron diferencias entre las zonas PMI1 y PMI3A, en contraste con PMI3B, ya que este último comparte características con BD (Figura 2b). En general, las coberturas tienen de baja a media similitud en cuanto a la composición y la abundancia de especies ($R=0,5753$), indicando que las zonas son diferentes. De acuerdo con el análisis ANOSIM, se obtuvo diferencias significativas entre las coberturas analizadas ($P=0,0001$).

Composición de la lluvia de semillas. Durante junio y julio del 2021, se recolectaron en total 11.096 semillas de 48 morfoespecies, de las cuales, se logró la identificación de 28 especies de 19 familias botánicas (Tabla 3). Las familias con mayor representatividad fueron Betulaceae, Asteraceae, Poaceae y Solanaceae; la especie más abundante fue *Alnus acuminata* Kunth, con 5.810 semillas, que corresponden al 52 % de semillas recolectadas, seguida de *V. crassiramea*, con 1.604, *S. pyramidalis*, con 839 y *H. lanatus*, con 716 semillas.

En la cobertura bosque se colectaron 5.657 semillas, distribuidas en 36 morfoespecies, de las cuales, se identificaron 22 especies pertenecientes a 16 familias botánicas; las más abundantes fueron Betulaceae, Asteraceae, Solanaceae y Rosaceae. En estas familias se encuentra el 97 % de las semillas recolectadas. El estrato arbóreo fue el más abundante, con un 94,6 %; seguido estrato arbustivo, con un 3,7 %; las trepadoras, con 1,3 %; las herbáceas, con un 0,4 % y las gramíneas no estuvieron presentes en la lluvia de semillas del bosque. En cuanto a las especies, la más abundantes fueron *A. acuminata*, seguida de *V. crassiramea*, *S. pyramidalis*, *S. oblongifolium* y *R. bogotensis*.

En la cobertura de Pastizal Misceláneo se presentaron 5.439 semillas, se distribuyeron en 39 morfoespecies, de las cuales, se identificaron 23 especies de 16 familias botánicas; la más abundante fue la familia Asteraceae, seguido de la familia Betulaceae, Poaceae y Solanaceae; en estas familias se encuentra el 83 % de las semillas recolectadas. En esta oportunidad, los estratos dominantes fueron el arbóreo y arbustivo, con el 59,1 % y 20,7 %, respectivamente; las gramíneas

ocuparon el tercer lugar, con 13,2 %; las trepadoras, con 5,8 % y las herbáceas, con 1,2 %. Las especies más abundantes para esta cobertura fueron *V. crassiramea*, *A. acuminata*, *H. lanatus* y *S. pyramidalis*.

Los resultados de densidad promedio de semillas por m² demostraron que el mayor valor fue observado en la cobertura de BD, con 1.721 semilla/m² (Tabla 2); la mayoría correspondiente a *A. acuminata* y *S. pyramidalis*, seguida de BI, con 1.109 semillas/m², con las especies *A. acuminata*, *V. crassiramea* y *S. oblongifolium* y en tercer lugar, se encuentra PMI3A, donde la especie más abundante fue *V. crassiramea*. Las coberturas con menor densidad de semillas/m² fueron en PMI3B y PMI1.

El índice de Margalef mostró una riqueza baja en la cobertura BI, los demás sectores presentaron media riqueza. El índice de Simpson mostró alta y media diversidad para los transectos de PMI1 y PMI3B y baja diversidad para BD y esto se debe a la alta abundancia de semillas de *A. acuminata*; según Shannon la diversidad fue baja para todos los sectores (Tabla 2).

En el análisis de la diversidad Beta se observó que dentro de la cobertura de bosque no se encuentran diferencias marcadas (Figura 2c). En cuanto al pastizal misceláneo se observó que PMI3A y PMI3B son similares a las coberturas de BD; por otra parte, la cobertura PMI1 presenta un comportamiento diferente a la cobertura de bosque. Se observó que, aproximadamente, el 80 % de la muestra de semillas se recolectó en la trampa ubicada a 6 m del borde del bosque; el 15 %, en las trampas ubicadas al 12 m y el 5 % restante, en las trampas ubicadas a 24 m; esto demuestra que, a mayor distancia del bosque, menor es el aporte de semillas proveniente de este sobre el pastizal, en concordancia con lo reportado por Alcalá *et al.* (2014). En general, las coberturas presentaron baja similitud en cuanto a la composición y abundancia de especies ($R=0,373$). De acuerdo con el análisis estadístico ANOSIM, se obtuvo diferencias significativas entre las coberturas analizadas ($P=0,0001$).

Comparación entre mecanismos y vegetación. En la comparación entre las especies y sus abundancias de las variables del banco, lluvia de semillas y la vegetación en pie, se observó que el componente 1 representó el 29,5 % de los datos; el componente 2, el 27,4 % y el componente 3, el 17,5 %, entre los tres se logró capturar el 74,4 % de los datos (Figura 3). Las variables banco de semillas y lluvia de semillas mostraron una mayor representación; los vectores explican cada una de las variables, que están compuestas por el mecanismo de regeneración evaluado y la cobertura.

El análisis mostró que existe una correlación muy alta y positiva para las especies y su abundancia entre los bancos de semillas del bosque y de los pastizales misceláneos aledaños, es decir, hay una alta semejanza entre estos. También, se observa una relación alta y positiva de los bancos de semillas con la vegetación de los pastizales; estas semejanzas están dadas por la presencia y la abundancia de especies herbáceas, como *O. corymbosa*, *S. nigrescens*, *S. americanum*, *C. clandestinus*, *H. lanatus*, *Galium corymbosum* Ruiz & Pav, entre otras y de especies arbóreas y arbustivas, como *V. crassiramea*, *S. pyramidalis*, *S. oblongifolium* y *B. latifolia* y la trepadora *R. bogotensis*, principalmente.

Tabla 2. Riqueza e índices de diversidad para las zonas estudiadas en el Bosque Las Mercedes.

Vegetación en pie						
COBERTURA	BD	BA	BI	PMI3B	PMI3A	PMI1
Riqueza	89	42	48	49	42	49
Abundancia	3132	476	785	472	493	550
Margalef	10,93	6,65	7,05	7,8	6,61	7,61
Shannon_H	3	3,21	2,96	3,06	2,79	3,01
Simpson_1-D	0,86	0,94	0,91	0,91	0,89	0,91
Densidad/ha	8250	3367	6867	1780	700	880
Banco de semillas germinable						
Riqueza	53	38	34	42	36	32
Abundancia	1892	1723	513	974	519	587
Margalef	6,89	4,97	5,29	5,96	5,6	4,86
Shannon_H	2,79	1,95	2,41	2,77	2,52	2,65
Simpson_1-D	0,9	0,71	0,83	0,89	0,86	0,9
Densidad/m ²	9653	29303	8724	10415	5908	5997
Lluvia de semillas						
Riqueza	28	15	10	22	18	29
Abundancia	4322	499	836	1125	2792	1522
Margalef	3,23	2,25	1,34	2,99	2,14	3,82
Shannon_H	0,56	0,74	1,22	1,95	1,49	2,2
Simpson_1-D	0,19	0,27	0,65	0,75	0,71	0,83
Densidad /m ²	1721	662	1109	299	741	404

BD- Bosque Denso; BA- Bosque Abierto; BI- Bosque Inundable; PMI3B- Pastizal Misceláneo (intervención desde 2017); PMI3A - Pastizal Misceláneo (intervención desde marzo de 2020) y PMI1- Pastizal Misceláneo (intervención desde enero de 2021).

Por otra parte, se observó una correlación alta y positiva entre la lluvia de semillas para las dos coberturas analizadas y estuvo dada, principalmente, por la presencia y la abundancia de la especie *A. acuminata*. La vegetación del bosque presenta una correlación media y positiva, tanto con los bancos de semillas como con la vegetación en pastizales y la lluvia de semillas; con este último, la relación es un poco más estrecha y se debe a que comparten especies arbóreas y arbustivas, como *A. acuminata*, *S. ovalifolium*, *A. parviflora* y *S. nigra*, entre otras.

Por último, se observa que no se presentan correlaciones, es decir, que actúan como variables independientes, la lluvia de semillas del bosque y pastizal, con el banco de semillas en la cobertura de bosque, el banco de semillas de pastizal y la vegetación de pastizal, es decir, en el agrupamiento dado por las especies y sus abundancias, es visible la división entre la lluvia de semillas en las dos coberturas, de los bancos de semillas y vegetación en pie (Figura 3).

Como conclusión, en los pastizales misceláneos, las especies exóticas e invasoras, como son *C. clandestinus* y *H. lanatus*, presentan las mayores abundancias y coberturas en la vegetación en pie y el banco de semillas. En el caso de la lluvia de semillas, la especie que se encontró en forma abundante fue *H. lanatus*, especialmente, en la cobertura PMI3B. En este sentido, Shono *et al.* (2007) y Muñoz

et al. (2017) encontraron que, en áreas fuertemente degradadas, donde los fenómenos de compactación del suelo, escases de lluvia de semillas, baja fertilidad del suelo y colonización agresiva de pastos exóticos, provocan que la regeneración natural no se dé o se presente de forma muy lenta; esto se puede apreciar en la composición de vegetación en pie y el banco de semillas, donde estas especies herbáceas invasoras continúan dominando, a pesar del aporte de semillas de especies nativas pioneras de hábito arbóreo y arbustivo desde el bosque y las especies plantadas en los procesos de restauración ecológica.

Al comparar el comportamiento del banco y la lluvia de semillas se observó que existen diferencias significativas entre las coberturas; sin embargo, también es visible algunos comportamientos similares entre el sector BD y PMI3B, que corresponde al sector donde se han desarrollado actividades de restauración ecológica desde el 2017; de acuerdo con los gráficos de ordenación multivariada, se confirma una mayor afinidad en cuanto a las especies y sus abundancias en el banco de semillas de estas dos coberturas. Asimismo, el gráfico elaborado para la vegetación en pie también mostró que PMI3B presenta semejanza con BD, más específicamente, con el transecto BDT7 y en la lluvia de semillas con PMI3A y PMI3B.



Figura 2. Ordenación multivariada con índice de similitud de Bray – Curtis. a) vegetación en pie, b) banco de semillas y c) lluvia de semillas.

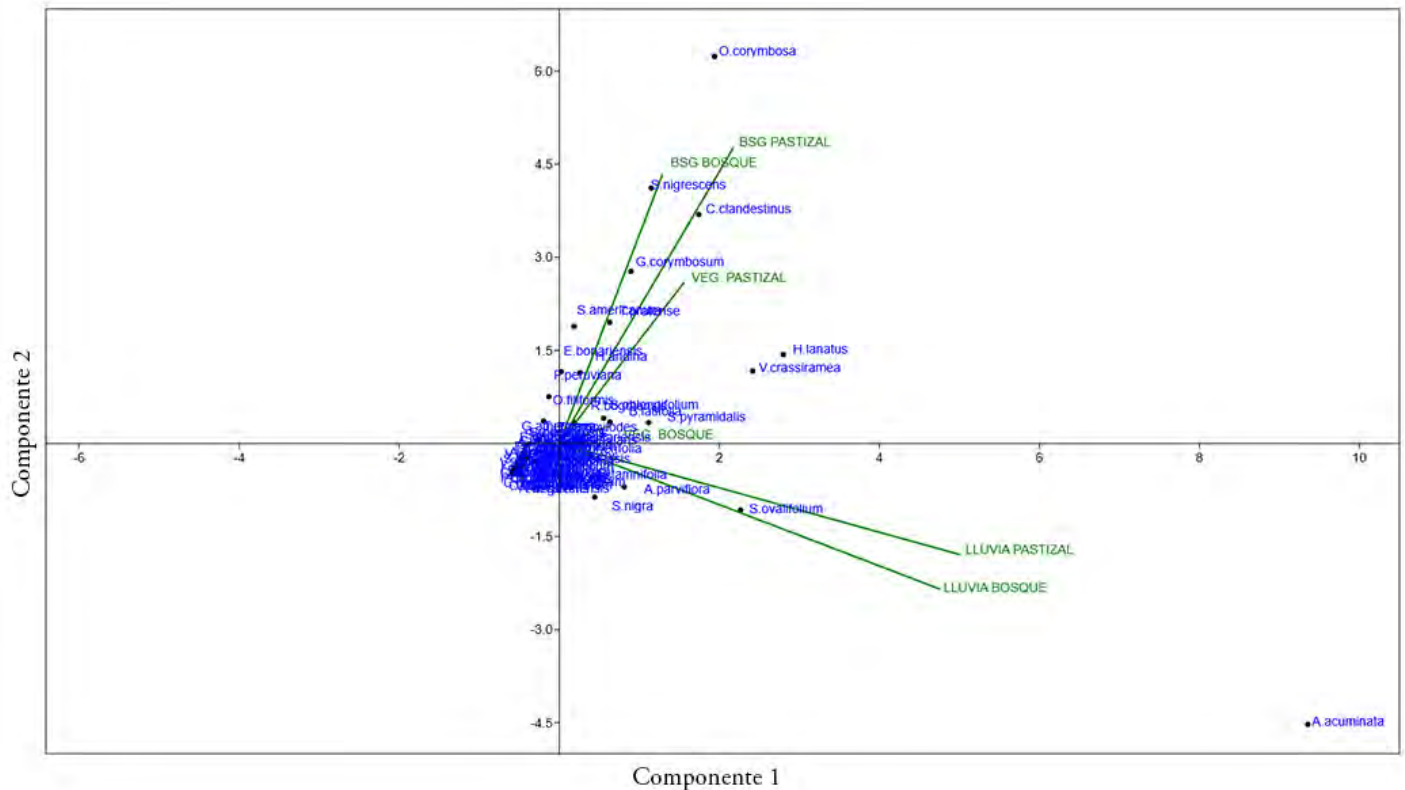


Figura 3. Componentes principales las especies vegetales y sus abundancias en la vegetación en pie (VEG), banco (BSG) y lluvia de semillas en el Bosque Las Mercedes y áreas anexas.

En los pastizales misceláneos, al desarrollar proyectos de restauración ecológica, se han plantado algunas especies dinamizadoras del proceso de sucesión vegetal, de rápido crecimiento y abundante producción de frutos (Pérez, 2016); por este motivo, se encuentran algunas semejanzas entre estas coberturas con bosque. En el caso de PMI3B, algunas de las especies plantadas se encuentran en producción de frutos y semillas, como *A. acuminata*, *S. pyramidalis* y *A. parviflora*, entre otras, por lo tanto, se observan en la lluvia y el banco de semillas.

La riqueza y la diversidad de especies fue alta para la vegetación en pie y el banco de semillas, tanto para el bosque como para los pastizales misceláneos y media a baja, para la lluvia de semillas; esto se presenta porque solo algunas especies pueden estar en dispersión, en el momento de la toma de datos.

Es importante exponer que la investigación también permitió determinar que la cobertura de bosque no corresponde a un ecosistema maduro, ya que, como se observó, presentan diferencias en cuanto a composición de especies y abundancias entre los diferentes sectores estudiados, especialmente, entre bosque denso y bosque abierto; además, la alta presencia de especies invasoras, colonizadoras agresivas u oportunistas, en el banco, la lluvia de semillas y la vegetación en pie, están causando modificaciones en esta cobertura, donde por competencia por la luz, están desplazando a otras especies nativas, importantes para este ecosistema.

Por otra parte, se observó que especies invasoras, colonizadoras agresivas u oportunistas frecuentes en el bosque, como *R. bogotensis*, *O. corymbosa*, *S. nigra* y *M. tamnifolia*, se encuentran formando parte del banco y la lluvia de semillas en los pastizales misceláneos, especialmente, en los sectores donde se ha observado un mayor avance en el proceso de restauración ecológica, como son PMI3B y PMI3A.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se considera que esta información resulta valiosa para el seguimiento a los procesos de restauración ecológica en el Bosque Las Mercedes, ya que se logró establecer que el análisis de las fases de la regeneración pueden ser consideradas como indicador del proceso de restauración ecológica en las coberturas vegetales, teniendo en cuenta que las áreas que fueron objeto de acciones de restauración ecológica asistida, desde hace más tiempo, ya muestran algunas semejanzas con la trayectoria sucesional más avanzada de bosque denso, mientras la cobertura con menor tiempo de intervención (PMI1), aún presenta comportamientos de zonas fuertemente antropizadas.

Se recomienda que en las áreas de cobertura de bosque y áreas anexas se continúen desarrollando acciones de restauración ecológica, específicamente, en lo referente al control de especies invasoras, colonizadoras agresivas u oportunistas (Tabla 3) y de regeneración natural asistida, donde se busque favorecer el desarrollo de las especies nativas que se expresan, a través del banco de semillas.

Tabla 3. Especies vegetales presentes en cada fase de regeneración natural y cobertura en el Bosque Las Mercedes.

Especie	Familia	Hábito	Origen	Capacidad de colonización	Veg. Bosque	Veg. Pastizal	Lluvia bosque	Lluvia pastizal	Bsg bosque	Bsg pastizal
<i>Saurauia scabra</i> (Kunth) D. Dietr.	Actinidiaceae	Arbusto	Nativa	Pionera	X	X	-	-	-	-
<i>Bomarea multiflora</i> (L.f.) Mirb.	Alstroemeriaceae	Enredadera	Nativa	Colonizadora agresiva	X	X	-	-	-	-
<i>Hydrocotyle andina</i> Cuatrec.	Apiaceae	Herbácea	Nativa	Pionera	X	X	-	-	X	X
<i>Scyphostelma tenellum</i> (L. fil.) Liede & Meve	Apocynaceae	Enredadera	Nativa	Oportunista	X	X	-	-	-	-
<i>Ilex kunthiana</i> Triana	Aquifoliaceae	Árbol	Nativa	Pionera	X	X	X	X	-	-
<i>Oreopanax incisus</i> (Willd. ex Schult.) Decne. & Planch.	Araliaceae	Árbol	Nativa	Pionera	X	X	X	X	-	-
<i>Verbesina crassiramea</i> S. F. Blake	Asteraceae	Árbol	Nativa	Pionera	X	X	X	X	X	X
<i>Smallanthus pyramidalis</i> (Triana) H. Rob.	Asteraceae	Árbol	Nativa	Pionera	X	X	X	X	X	X
<i>Erigeron bonariensis</i> L.	Asteraceae	Herbácea	Nativa	Pionera	X	X	-	-	X	X
<i>Baccharis latifolia</i> (Ruiz & Pav.) Pers.	Asteraceae	Arbusto	Nativa	Pionera	X	X	X	X	X	X
<i>Gamochaeta americana</i> (Mill.) Wedd.	Asteraceae	Herbácea	Nativa	Pionera	X	-	-	-	X	X
<i>Taraxacum campyloides</i> G. E. Haglund	Asteraceae	Herbácea	Exótica	Invasora	X	X	-	-	-	X
<i>Dendrophorbium americanum</i> (L. fil.) C. Jeffrey	Asteraceae	Enredadera	Nativa	Pionera	X	-	-	-	-	-
<i>Baccharis bogotensis</i> Kunth	Asteraceae	Arbusto	Nativa	Pionera	-	X	-	-	X	X
<i>Sonchus oleraceus</i> L.	Asteraceae	Herbácea	Exótica	Invasora	X	-	-	-	X	X
<i>Senecio madagascariensis</i> Poir.	Asteraceae	Herbácea	Exótica	Oportunista	-	X	-	-	X	X
<i>Pseudognaphalium cheiranthifolium</i> (Lam.) Hilliard & B. L. Burt	Asteraceae	Herbácea	Nativa	Oportunista	-	-	-	-	X	X
<i>Sigesbeckia orientalis</i> L.	Asteraceae	Herbácea	Exótica	Oportunista	X	-	-	-	X	-
<i>Hypochaeris glabra</i> L.	Asteraceae	Herbácea	Exótica	Oportunista	-	X	-	-	X	X
<i>Ageratina aristei</i> (B. L. Rob.) R. M. King & H. Rob.	Asteraceae	Arbusto	Nativa	Pionera	X	X	-	-	-	-
<i>Barnadesia spinosa</i> L. fil.	Asteraceae	Arbusto	Nativa	Pionera	X	X	-	-	-	-
<i>Alnus acuminata</i> Kunth	Betulaceae	Árbol	Nativa	Pionera	X	X	X	X	X	X
<i>Vasconcellea pubescens</i> A. DC.	Caricaceae	Árbol	Nativa	Pionera	X	-	-	-	-	-
<i>Cucumis anguria</i> L.	Cucurbitaceae	Herbácea	Exótica	Colonizadora agresiva	X	-	-	-	-	-
<i>Cucurbita ficifolia</i> Bouché	Cucurbitaceae	Enredadera	Exótica	Invasora	X	-	-	-	-	-
<i>Cyperus eragrostis</i> Lam.	Cyperaceae	Gramínea	Nativa	Pionera	-	-	-	-	X	X
<i>Rhynchospora nervosa</i> (Vahl) Boeckeler	Cyperaceae	Gramínea	Nativa	Oportunista	X	-	-	-	X	X
<i>Vallea stipularis</i> Mutis ex L. fil.	Elaeocarpaceae	Árbol	Nativa	Pionera	X	X	X	X	X	-
<i>Escallonia pendula</i> (Ruiz & Pav.) Pers.	Escalloniaceae	Árbol	Nativa	Pionera	X	X	-	-	-	-

Continuación Tabla 3.

Especie	Familia	Hábito	Origen	Capacidad de colonización	Veg. Bosque	Veg. Pastizal	Lluvia bosque	Lluvia pastizal	Bsg bosque	Bsg pastizal
<i>Croton hibiscifolius</i> Kunth ex Spreng.	Euphorbiaceae	Árbol	Nativa	Pionera	X	X	-	-	-	-
<i>Trifolium pratense</i> L.	Fabaceae	Herbácea	Exótica	Invasora	-	X	-	-	X	X
<i>Trifolium repens</i> L.	Fabaceae	Herbácea	Exótica	Invasora	-	X	-	-	X	X
<i>Acacia decurrens</i> Willd.	Fabaceae	Árbol	Exótica	Invasora	X	-	X	X	-	-
<i>Inga cylindrica</i> (Vell.) Mart.	Fabaceae	Árbol	Nativa	Pionera	X	X	-	-	-	-
<i>Juglans neotropica</i> Diels	Juglandaceae	Árbol	Nativa	Climax	X	X	-	-	-	-
<i>Salvia palifolia</i> Kunth	Lamiaceae	Herbácea	Nativa	Pionera	X	X	-	-	X	X
<i>Cedrela montana</i> Moritz ex Turcz.	Meliaceae	Árbol	Nativa	Climax	X	X	-	-	-	-
<i>Morella pubescens</i> (Humb. & Bonpl. ex Willd.) Wilbur	Myricaceae	Árbol	Nativa	Pionera	X	X	X	X	-	-
<i>Myrcianthes leucoxyla</i> (Ortega) Mc Vaugh	Myrtaceae	Árbol	Nativa	Pionera	X	X	-	-	-	-
<i>Cranichis ciliata</i> Kunth	Orchidaceae	Herbácea	Nativa	Oportunista	X	-	-	-	-	-
<i>Stenorrhynchos speciosum</i> (Jacq.) Rich.	Orchidaceae	Herbácea	Nativa	Oportunista	X	-	-	-	-	-
<i>Castilleja scorzonierifolia</i> Kunth	Orobanchaceae	Herbácea	Exótica	Oportunista	X	X	-	-	-	-
<i>Oxalis filiformis</i> Kunth	Oxalidaceae	Herbácea	Nativa	Pionera	X	X	-	-	X	X
<i>Bocconia frutescens</i> L.	Papaveraceae	Árbol	Nativa	Pionera	X	-	X	-	X	X
<i>Passiflora tripartita</i> (Juss.) Poir.	Passifloraceae	Enredadera	Nativa	Colonizadora agresiva	X	X	-	-	X	X
<i>Phytolacca bogotensis</i> Kunth	Phytolaccaceae	Herbácea	Nativa	Pionera	X	-	X	X	X	X
<i>Piper bogotense</i> C. DC.	Piperaceae	Arbusto	Nativa	Oportunista	X	-	-	-	-	-
<i>Pittosporum undulatum</i> Vent.	Pittosporaceae	Árbol	Exótica	Invasora	X	X	X	-	-	-
<i>Veronica persica</i> Poir.	Plantaginaceae	Herbácea	Exótica	Oportunista	-	-	-	-	X	X
<i>Cenchrus clandestinus</i> (Hochst. ex Chiov.) Morrone	Poaceae	Gramínea	Exótica	Invasora	X	X	-	-	X	X
<i>Holcus lanatus</i> L.	Poaceae	Gramínea	Exótica	Invasora	X	X	-	X	X	X
<i>Eragrostis tenuifolia</i> (A.Rich.) Hochst. ex Steud.	Poaceae	Gramínea	Exótica	Oportunista	-	-	-	-	-	X
<i>Cortaderia nitida</i> (Kunth) Pilg.	Poaceae	Gramínea	Nativa	Oportunista	X	-	-	-	X	-
<i>Muehlenbeckia tamnifolia</i> (Kunth) Meisn.	Polygonaceae	Enredadera	Nativa	Colonizadora agresiva	X	X	X	X	X	X
<i>Persicaria nepalensis</i> (Meisn.) H. Gross	Polygonaceae	Herbácea	Exótica	Oportunista	X	X	-	-	X	-
<i>Myrsine guianensis</i> (Aubl.) Kuntze	Primulaceae	Árbol	Nativa	Intermedia	X	X	X	X	-	-
<i>Frangula goudotiana</i> (Triana & Planch.) Grubov	Rhamnaceae	Árbol	Nativa	Pionera	X	X	X	-	-	-
<i>Rubus bogotensis</i> L.	Rosaceae	Enredadera	Nativa	Colonizadora agresiva	X	X	X	X	X	X
<i>Prunus serotina</i> Ehrh.	Rosaceae	Árbol	Exótica	Oportunista	X	X	-	-	-	-
<i>Oldenlandia corymbosa</i> L.	Rubiaceae	Herbácea	Exótica	Invasora	X	X	-	-	X	X

Continuación Tabla 3.

Especie	Familia	Hábito	Origen	Capacidad de colonización	Veg. Bosque	Veg. Pastizal	Lluvia bosque	Lluvia pastizal	Bsg bosque	Bsg pastizal
<i>Galium corymbosum</i> Ruiz & Pav.	Rubiaceae	Enredadera	Nativa	Oportunista	-	X	-	-	X	X
<i>Galium hypocarpium</i> (L.) Endl. ex Griseb.	Rubiaceae	Enredadera	Nativa	Oportunista	X	X	X	X	X	-
<i>Abatia parviflora</i> Ruiz & Pav.	Salicaceae	Árbol	Nativa	Pionera	X	X	-	X	-	-
<i>Xylosma spiculifera</i> (Tul.) Triana & Planch.	Salicaceae	Árbol	Nativa	Pionera	X	X	X	-	-	-
<i>Dodonaea viscosa</i> (L.) Jacq.	Sapindaceae	Arbusto	Nativa	Pionera	X	X	-	-	-	-
<i>Billia rosea</i> (Planch. & Linden) C. Ulloa & P. M. Jørg.	Sapindaceae	Árbol	Nativa	Pionera	X	X	-	-	-	-
<i>Alonsoa meridionalis</i> (L. fil.) Kuntze	Scrophulariaceae	Herbácea	Nativa	Pionera	X	-	-	-	X	X
<i>Solanum oblongifolium</i> Humb. & Bonpl. ex Dunal	Solanaceae	Arbusto	Nativa	Colonizadora agresiva	X	X	X	-	X	X
<i>Solanum nigrescens</i> M. Martens & Galeotti	Solanaceae	Herbácea	Nativa	Pionera	X	X	-	-	X	X
<i>Solanum americanum</i> Mill.	Solanaceae	Herbácea	Nativa	Pionera	-	-	-	-	X	X
<i>Physalis peruviana</i> L.	Solanaceae	Herbácea	Nativa	Pionera	X	X	X	-	X	X
<i>Solanum ovalifolium</i> Humb. & Bonpl. ex Dunal	Solanaceae	Arbusto	Nativa	Pionera	X	X	X	X	X	-
<i>Cestrum buxifolium</i> Kunth	Solanaceae	Arbusto	Nativa	Pionera	X	X	-	-	-	-
<i>Salpichroa tristis</i> Walp.	Solanaceae	Arbusto	Nativa	Colonizadora agresiva	X	X	X	-	-	-
<i>Solanum caripense</i> Humb. & Bonpl. ex Dunal	Solanaceae	Herbácea	Nativa	Oportunista	X	X	-	-	-	-
<i>Cestrum mutisii</i> Willd. ex Roem. & Schult.	Solanaceae	Arbusto	Nativa	Pionera	X	-	-	-	-	-
<i>Duranta mutisii</i> L.f.	Verbenaceae	Arbusto	Nativa	Pionera	X	X	X	-	-	-
<i>Citharexylum subflavescens</i> S.F.Blake	Verbenaceae	Árbol	Nativa	Pionera	X	X	X	-	-	-
<i>Verbena litoralis</i> Kunth	Verbenaceae	Herbácea	Nativa	Pionera	-	-	-	-	X	X
<i>Sambucus nigra</i> L.	Viburnaceae	Árbol	Exótica	Colonizadora agresiva	-	-	X	X	-	-
<i>Viburnum triphyllum</i> Benth.	Viburnaceae	Árbol	Nativa	Pionera	X	X	-	-	-	-

Agradecimientos. La autora agradece al Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis, por la financiación y apoyo para el desarrollo del proyecto de investigación. A la bióloga Alba Luz González Pinto, por su asesoría en la formulación y ejecución de la investigación y al personal de apoyo técnico y operativo de la línea de Investigación en restauración ecológica de subdirección científica, por el apoyo en campo y laboratorio. **Financiación:** Este estudio fue financiado por el Jardín Botánico José Celestino Mutis, a través del proyecto de inversión 7679 “Investigación para la conservación de los ecosistemas y la flora de la Región y Bogotá” (contrato No. 097 del 2021). **Conflicto de intereses:** El manuscrito fue preparado y revisado por la autora y declara que no existe ningún conflicto de interés que ponga en riesgo la validez de los resultados presentados. **Contribución de los autores:** La autora

realizó la conceptualización, la curación de datos, el análisis formal, la investigación, metodología, visualización, redacción del borrador, revisión y edición. La administración del proyecto, supervisión y validación fue realizada por la Coordinadora de la Línea de investigación en restauración ecológica, Alba Luz González Pinto

REFERENCIAS

ABREU, V.; DIAS, H.; KUNZ, S.; VAN DEN BERG, E.; GARBIN, M. 2021. The soil seed bank as an indicator of altitudinal gradient in a montane tropical forest. *Journal of Tropical Forest Science*. 33(4):473-481. <http://dx.doi.org/10.26525/jtfs2021.33.4.473>

- ALCALÁ, R.E.; ALONSO, R.L.; GUTIÉRREZ-GRANADOS, G. 2014. Seed shadow of *Swietenia macrophylla* remnant trees in a Mexican rainforest: Implications for forest management. *Botanical Sciences*. 92(4):599-605. <https://doi.org/10.17129/botsci.137>
- BEDOYA-PATÍÑO, J.G.; ESTÉVEZ-VARÓN, J.V.; CASTAÑO-VILLA, G.J. 2010. Banco de semillas del suelo y su papel en la recuperación de los bosques tropicales. *Boletín Científico del Centro de Museos*. 14(2):77-91.
- CALEGARI, L.; MARTINS, S.V.; CAMPOS, L.C.; SILVA, E.; GLERIANI, J.M. 2013. Avaliação do banco de sementes do solo para fins de restauração florestal em Carandaí, MG. *Revista Árvore*. 37(5):871-880. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622013000500009>
- CAMPO KURMEN, J.M. 2010. Estructura, riqueza y composición de plantas arborescentes en un bosque de niebla entresacado del Tolima (Colombia). *Acta Biológica Colombiana*. 15(2):247-262.
- CAUSTON, C.; JÄGER, H.; JIMÉNEZ-UZCÁTEGUI, G.; KEITH, I.; JENNA WONG, L.; PAGAD, S. 2020. Global register of introduced and invasive species - Galápagos Islands, Ecuador. Version 1.5. Invasive Species Specialist Group ISSG. Checklist dataset. <https://doi.org/10.15468/gabofb>
- CAVALLERO, L.; ALAGGIA, F.G.; LÓPEZ, D.R. 2024. Avance de la frontera urbana a expensas de bosques nativos en diferentes categorías de protección en el valle de Traslasierra, Córdoba (Argentina). *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica*. 59(1):1-18. <https://doi.org/10.31055/1851.2372.v59.n1.42560>
- DÍAZ-ESPINOSA, A.M.; DÍAZ-TRIANA, J.E.; VARGAS RÍOS, O. 2012. Catálogo de plantas invasoras de los humedales de Bogotá. Grupo de Restauración Ecológica de la Universidad Nacional de Colombia y Secretaría Distrital de Ambiente. Bogotá, D.C., Colombia. 248p.
- FERNÁNDEZ, F.; VELASCO, V.; GUERRERO, J.; GALVIS, M.; VIANA, A. 2016. Recuperación ecológica de áreas afectadas por un incendio forestal en la microcuenca Tintales (Boyacá, Colombia). *Colombia Forestal*. 19(2):143-160. <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2016.2.a02>
- FORESTO, E.; AMUCHÁSTEGUI, M.; NUÑEZ, C.; ZORZA, E. 2021. Comportamiento del banco de semilla de malezas en un sistema agrícolaganadero intervenido por diferentes tipos de labranzas. *Ciencia e Interculturalidad*. 28(01):151-165. <https://doi.org/10.5377/rci.v28i01.11466>
- GARWOOD, N.C. 1989. Tropical soil seed banks: A review. En: Leck, M.A.; Parker, V.T.; Simpson, R.L. (eds.), *Ecology of soil seed banks*. Academic Press Inc. San Diego, CA. p. 9-21. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-440405-2.50014-2>
- GIORIA, M.; PYŠEK, P. 2016. The Legacy of Plant Invasions: Changes in the Soil Seed Bank of Invaded Plant Communities. *BioScience*. 66(1):40-53.
- HAMMER, Ø.; HARPER, D.A.T.; RYAN, P.D. 2001. PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontología Electrónica*. 4(1):4.
- HARMS, K.E.; PAINE, C.E.T. 2003. Regeneración de árboles tropicales e implicaciones para el manejo de bosques naturales. *Ecosistemas*. 12(3).
- HILL, R.L.; GOURLAY, A.H.; BARKER, R.J. 2001. Survival of *Ulex europaeus* seeds in the soil at three sites in New Zealand. *New Zealand Journal Botany*. 39(2):235-244. <https://doi.org/10.1080/0028825X.2001.9512734>
- MA, M.; BASKIN, C.C.; LI, W.; ZHAO, Y.; ZHAO, Y.; ZHAO, L.; CHEN, N.; DU, G. 2019. Seed banks trigger ecological resilience in subalpine meadows abandoned after arable farming on the Tibetan Plateau. *Ecological Applications*. 29(7):1-13. <https://www.jstor.org/stable/26797125>
- MARTÍNEZ, J. 2023. El cálculo de diversidad biológica. Parte I: Diversidad biológica alfa. *Tikalía*. 41(1):48-62.
- MARTINS, S.V. 2016. Recuperação de áreas degradadas: ações em áreas de preservação permanente, voçorocas, taludes rodoviários e de mineração. Ed. Viçosa: Aprenda Fácil (Brasil). 270p.
- MORA-DONJUÁN, C.A.; BURBANO-VARGAS, O.N.; MÉNDEZ-OSORIO, C.; CASTRO-ROJAS, D.F. 2017. Evaluación de la biodiversidad y caracterización estructural de un Bosque de Encino (*Quercus* L.) en la Sierra Madre del Sur, México. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*. 14(35):68-75. <https://doi.org/10.18845/rfmk.v14i35.3154>
- MORA-GOYES, M.F.; BARRERA-CATAÑO, J.I. 2015. Catálogo de especies invasoras del territorio CAR. Pontificia Universidad Javeriana, Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca – CAR. Bogotá, D.C. 220p.
- MOSCHELLA, P. 2023. Pérdida de bosques amazónicos por expansión urbana en el Perú. *Revista Kawsaypacha: Sociedad y Medio Ambiente*. 12:A007. <https://dx.doi.org/10.18800/kawsaypacha.202302.a007>
- MOSCOSO MARÍN, L.B.; DIEZ GÓMEZ, M.C.D. 2005. Banco de semillas en un bosque de roble de la cordillera central colombiana. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*. 58(2):2931-2943.
- MUÑOZ, J. 2017. Regeneración Natural: Una revisión de los aspectos ecológicos en el bosque tropical de montaña del sur del Ecuador. *Bosques Latitud Cero*. 7(2):130-143

- MUÑOZ, J. 2022. Producción de frutos y semillas de *Cucurbita ficifolia* Bouché y *Rubus bogotensis* Kunth en un área bajo restauración ecológica en Bogotá D.C. v2.0. Jardín Botánico de Bogotá "José Celestino Mutis". <https://doi.org/10.15472/3ssdhc>
- MUÑOZ R., D.; MORALES P., A.; GONZÁLEZ P., A. 2017. Banco de semillas germinable en la franja terrestre de dos humedales urbanos. Colombia Forestal. 20(1):31-44.
- NORDEN, N. 2014. Del porqué la regeneración natural es tan importante para la coexistencia de especies en los bosques tropicales. Colombia Forestal. 17(2):247-261. <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2014.2.a08>
- PADILLA, F.M. 2008. Factores limitantes y estrategias de establecimiento de plantas leñosas en ambientes semiáridos: implicaciones para la restauración. Ecosistemas. 17(1):155-159.
- PAUCHARD, A.; SANCHEZ, P.; ALDRIDGE, D.; DÍAZ, G.; SOTO, M.; VOLKART, N.; SKEWES, O.; WONG, L.; PAGAD, S. 2020. Global Register of Introduced and Invasive Species - Chile. Version 2.7. Invasive Species Specialist Group ISSG. Checklist dataset <https://doi.org/10.15468/n4ofia>
- PÉREZ, V. 2016. Conectividad del último relicto natural de bosque de planicie de Bogotá con el humedal la conejera a través del nodo de biodiversidad Las Mercedes. Boletín Red Colombiana de Restauración Ecológica. 10(1):11-15.
- PÉREZ, V. 2020. Evaluación del avance de recuperación de un relicto de bosque de planicie inundable y no inundable mediante la caracterización de la composición y estructural vegetal. Luna Azul. (50):156-173. <https://doi.org/10.17151/luaz.2020.50.8>
- POORTER, L.; AMISSAH, L.; BONGERS, F.; HORDIJK, I.; KOK, J.; LAURANCE, S.; LOHBECK, M.; MARTÍNEZ-RAMOS, M.; MATSUO, T.; MEAVE, J.; MUÑOZ, R.; PEÑA-CLAROS, M.; VAN DER SANDE, M. 2023. Successional theories. Biological Reviews. 98:2049-2077. <https://doi.org/10.1111/brv.12995>
- ROJAS-JIMÉNEZ, K. 2022. Ciencia de datos para ciencias naturales. Disponible desde Internet en: https://bookdown.org/keilor_rojas/CienciaDatos/
- SHONO, K.; CADAWENG, E.; DURST, P. 2007. Application of assisted natural regeneration to restore degraded tropical forestlands. Restoration Ecology. 15(4):620-626. <https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2007.00274.x>
- SOLORZA-BEJARANO, J.H. 2012. Evaluación de la regeneración de *Acacia decurrens*, *Acacia melanoxylon* y *Ulex europaeus* en áreas en proceso de restauración ecológica. Luna Azul. 34:66-80.
- SOLORZA-BEJARANO, J.H. 2017. Patrón de regeneración de la plántula de *Genista monspessulana* (L.) L.A.S. Johnson, en dos escenarios de restauración ecológica. Colombia Forestal. 20(2):131-143. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2017.2.a03>
- SETO, K.C.; FRAGKIAS, M.; GUNERALP, B.; REILLY, M.K. 2011. A Meta-Analysis of Global Urban Land Expansion. PLoS ONE. 6(8): e23777. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0023777>
- TERCERO-BUCARDO, N.; ROVERE, A. 2010. Patrones de dispersión de semillas y colonización de *Misodendrum punctulatum* (Misodendraceae) en un matorral postfuego de *Nothofagus antarctica* (Nothofagaceae) del noroeste de la Patagonia. Revista Chilena de Historia Natural. 83(3):375-386. <http://dx.doi.org/10.4067/S0716-078X2010000300005>
- VARGAS, O.; LEÓN, O.; DÍAZ, A. 2009. Restauración ecológica en zonas invadidas por retamo espinoso y plantaciones forestales de especies exóticas. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias Departamento de Biología. Bogotá, Colombia. 306p.
- VELOSA, R.; DOMÍNGUEZ, K.; ROMERO, Y. 2018. Composición y diversidad del banco de semillas en áreas urbanas fragmentadas de piedemonte, Villavicencio, Colombia. Ingenierías USBMed. 9(1):86-96. <https://doi.org/10.21500/20275846.3317>

Arquitectura de referencia para un laboratorio virtual como herramienta de sistematización de datos de biodiversidad

Reference architecture for a virtual laboratory as a biodiversity data systematization tool

Juan Pablo Cuevas-Gonzalez^{1*} ; Fernando Fernandez-Mendez¹ ; Kelly T. Bocanegra-González^{1,2} 

¹Universidad del Tolima, Grupo de Investigación en Biodiversidad y Dinámica de Ecosistemas Tropicales. Ibagué - Tolima, Colombia. e-mail: fmendez@ut.edu.co; jpcuevas@ut.edu.co

²Royal Botanic Garden Edinburgh. Edinburgh, United Kingdom. e-mail: ktbocanegr@gmail.com

*autor de correspondencia: jpcuevas@ut.edu.co

Cómo citar: Cuevas-Gonzalez, J.P.; Fernandez-Mendez, F.; Bocanegra-González, K.T. 2024. Arquitectura de referencia para un laboratorio virtual como herramienta de sistematización de datos de biodiversidad. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 27(2):e2389. <http://doi.org/10.31910/rudca.v27.n2.2024.2389>

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 26 de 2023

Aceptado: julio 15 de 2024

Editado por: Helber Adrián Arévalo Maldonado

RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue desarrollar un laboratorio virtual para la gestión de datos de biodiversidad en la región del Pacífico colombiano. La plataforma creada integra una base de datos relacional en PostgreSQL, el ecosistema JupyterHub y servicios de Amazon Web Services (AWS), con infraestructuras de datos globales. Se recopilaron 28.058 registros entre 2004 y 2022, destacando 44 familias, 119 géneros y 198 especies, incluyendo, especies maderables amenazadas, como *Carapa guianensis*, *Humiristrum procerum* y *Magnolia calimaensis*. Entre las familias con mayores registros se encuentran Fabaceae, Arecaceae, Malvaceae y Moraceae, con 88 especies en total. La ejecución de rutinas de trabajo no excedió los 11 minutos en Python y R. Los servicios de AWS demostraron tiempos de respuesta de 200 ms y un tráfico de red de 0.1 GB/s. El inicio y cese de contenedores se realizó en 10 y 5 segundos, con un uso promedio de CPU y RAM, del 80 y 75%, respectivamente. Además, se almacenaron 4 GB de objetos con tiempos de respuesta inferiores a 100 ms. Con la ayuda de las herramientas implementadas se logró prevenir errores en los datos dasométricos y taxonómicos, destacando la importancia del control de calidad y la validación de datos. La implementación de este laboratorio virtual permitió un manejo eficaz de grandes volúmenes de datos, facilitando la colaboración en tiempo real entre investigadores y proporcionando una herramienta escalable y flexible para el análisis de datos ecológicos, promoviendo una comprensión más completa de la biodiversidad en la región.

Palabras clave: Computación en la nube; Conservación de la biodiversidad; Curaduría; Gestión de datos; Sistemas de información sobre biodiversidad.

ABSTRACT

The objective of this research was to develop a virtual laboratory for the management of biodiversity data in the Colombian Pacific Region. The platform created integrates a relational database in PostgreSQL, the JupyterHub ecosystem, and Amazon Web Services (AWS) services with global data infrastructures. 28058 records were collected between 2004 and 2022, highlighting 44 families, 119 genera, and 198 species, including threatened timber species such as *Carapa guianensis*, *Humiristrum procerum*, and *Magnolia calimaensis*. Among the families with the most significant number of records are Fabaceae, Arecaceae, Malvaceae, and Moraceae, which have 88 species. The execution of work routines was at most 11 minutes in Python, and R. AWS services demonstrated response times of 200 ms and network traffic of 0.1 GB/s. The start and stop of containers were carried out in 10 and 5 seconds, with an average CPU and RAM usage of 80% and 75%, respectively. In addition, 4 GB of objects were stored with response times of less than 100 ms. With the help of the implemented tools, it was possible to prevent errors in the dasometric and taxonomic data, highlighting the importance of quality control and data validation. The implementation of this virtual laboratory allowed an efficient management of large volumes of data, facilitating real-time collaboration between researchers and providing a scalable and flexible tool for the analysis of ecological data, promoting a more complete understanding of biodiversity in the region.

Keywords: Biodiversity conservation; Biodiversity information systems; Cloud computing; Curatorship; Data management.

INTRODUCCIÓN

El uso de tecnologías de información se ha convertido en elemento fundamental en la investigación de la biodiversidad, especialmente, en el escenario actual, dada la necesidad de consolidar y estructurar los datos provenientes de una amplia gama de fuentes, tanto espaciales como temporales, de las características de dicha biodiversidad (Shin & Choi, 2015; Soltis *et al.* 2016; Chen & Hu, 2021; Alberti & Massone, 2022). La información que se produce de estos datos posibilita la comprensión del comportamiento de las especies, desde sus patrones evolutivos, ecológicos, hasta su respuesta al cambio climático (Davenport & Prusak, 1998); sin embargo, el almacenamiento creciente de registros de biodiversidad genera volúmenes masivos de información, lo que limita su manipulación eficaz con las herramientas actuales, requiriendo el uso de técnicas analíticas más eficientes, para el modelamiento y explotación de la información (Hampton *et al.* 2013).

Actualmente, existen referentes de infraestructuras de datos globales para el estudio de la biodiversidad y el monitoreo de carbono, que propenden la accesibilidad, el uso, la distribución y el procesamiento de los datos, tales como GBIF (Global Biodiversity Information Facility), ForestPlot, NEON (National Ecological Observatory Network) e ICOS (Integrated Carbon Observatory System) (Sierra *et al.* 2017; ForestPlots.NET, 2020; GBIF, 2020). Estas infraestructuras, además sirven como herramienta de apoyo en la toma de decisiones y planteamiento de políticas de desarrollo sostenible (GBIF, 2022), pues permiten ajustar modelos para la comprensión y la generalización de las causas, patrones, mecanismos y consecuencias de los fenómenos naturales, favoreciendo las evaluaciones implementadas por el Grupo de Observaciones de la Tierra GEO (GEO, 2015; Cooper & Noonan-Mooney, 2013) y, subsecuentemente, los objetivos del protocolo de Kyoto (ONU, 1998), la Organización de las Naciones Unidas ONU (2018), el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático IPCC (2019) y la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura FAO (2022). Colombia cuenta con el Sistema de Información de Biodiversidad (SiB), el cual, es parte del Sistema de Información Ambiental de Colombia (SIAC) y es, en sí mismo, un nodo de información articulado al GBIF (Muñoz *et al.* 2007; SiB, 2017).

Estas infraestructuras de datos, por sí mismas, no logran una integración automática y escalable entre los datos y el desarrollo de nuevo conocimiento en ambientes de trabajos científicos; por lo general, requieren replicación de datos, procedimientos de exportación, importación, tratamiento y análisis adicionales, generando entornos que consumen tiempo y son vulnerables a errores (Noreña-P. *et al.* 2018). Como resultado, el procesamiento de datos se debe repetir en cada tarea al momento de ser abordada, lo que resulta en un mayor gasto de energía (Grattarola *et al.* 2019). Así, pues, se deben aunar esfuerzos en prácticas científicas más competentes, donde los datos y los procesos se gestionan con mayor eficiencia, fiabilidad y reproducibilidad. Esto implica flexibilidad a la hora de integrar herramientas de almacenamiento, análisis y visualización de datos, entendidos aquí como el conjunto

de enfoques metodológicos, algoritmos y herramientas de software (Hu & Che, 2019; Andjarwirawan *et al.* 2020).

En el caso particular de los grupos de investigación académica, permanentemente, se están generando conjuntos de datos que se suelen almacenar en diferentes temas, de manera que se distribuyen en innumerables documentos, hojas de cálculo y archivos, lo que conlleva a que los datos resultantes logren escasamente ser sintetizados en el corto plazo, incluso, si existe un individuo exclusivamente en esta labor (Devictor & Bensauade-Vincent 2016; Senterre & Wagner, 2016). En este contexto, es necesario crear un espacio que conecte diferentes infraestructuras de datos con tecnologías en la nube, como lo son Amazon Web Services (AWS), Google Cloud, Oracle entre otros. Esto permitiría mejorar la gestión y el procesamiento de datos de biodiversidad y promover la colaboración entre grupos de investigación.

Es aquí, donde el concepto de ambiente virtual hace referencia a un sistema que implementa, administra y controla múltiples instancias virtuales, permitiendo el intercambio de datos, a largo plazo, para usos más allá de su propósito inicial (Bart *et al.* 2018; Pimentel *et al.* 2019). En este sentido, posee características para explotar al máximo el potencial de las tecnologías encargadas del almacenamiento, análisis y modelización de la información tanto en el componente de software como de hardware (Bart *et al.* 2018).

En esta investigación se desarrolló un laboratorio virtual para el análisis, la gestión y la sistematización de los datos y procesos, teniendo por objeto desarrollar una arquitectura de referencia, que mejore la interactividad, la colaboración, la reproducibilidad, la latencia, el rendimiento y la persistencia en el manejo de datos de biodiversidad y sirviendo como núcleo de recolección y estandarización de la información, generada por el proyecto “Distribución de la diversidad genética de especies maderables amenazadas como base del manejo forestal sostenible en los bosques húmedos del pacífico colombiano”. Para lograr estos objetivos, se implementó una base de datos relacional, que permite la integración y la gestión eficiente de grandes volúmenes de datos de biodiversidad. Además, se desarrollaron entornos de trabajo colaborativos para facilitar la interacción y la cooperación entre investigadores en tiempo real. También, se establecieron procedimientos para la depuración y la estandarización de datos, asegurando la calidad y la consistencia de la información recolectada. Finalmente, se evaluó el rendimiento del laboratorio virtual.

Este trabajo destaca un enfoque integral en la gestión de datos ecológicos, combinando la integración de datos de diferentes fuentes, como inventarios forestales, estudios ecológicos y la experiencia práctica de los autores en la implementación de soluciones de laboratorio virtual. Esta aproximación permite la creación de un laboratorio virtual, que aplica técnicas de análisis y visualización de datos para la toma de decisiones en la gestión de la biodiversidad. La implementación de soluciones en la nube junto a herramientas de software libre permite una mayor escalabilidad y acceso a los datos y herramientas de análisis desde cualquier lugar, lo que facilita la colaboración y la toma de decisiones en tiempo real, permitiendo una mayor flexibilidad y portabilidad en la implementación de estas tecnologías en el campo forestal.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio. Para este estudio se visitaron 13 localidades ubicadas en tres departamentos del pacífico colombiano, desde junio a diciembre del 2021, cuya cobertura geográfica se puede observar en la figura 1.

Se recolectaron datos dasométricos y geográficos en el campo, utilizando las metodologías descritas por Melo & Vargas (2003) y Chapman & Wieczorek (2022), respectivamente. Las muestras

botánicas se clasificaron siguiendo la metodología de Gentry (1996) y se utilizaron bolsas Ziploc y gel de sílice para la preservación de las muestras genéticas, según las recomendaciones de Bocanegra-González & Guillemín (2018). Los datos se digitalizaron en hojas de cálculo en formato .xlsx, para minimizar los errores humanos y se generó un archivo geográfico, mediante el uso del GPS en formato .gpx, para cada archivo tabular.

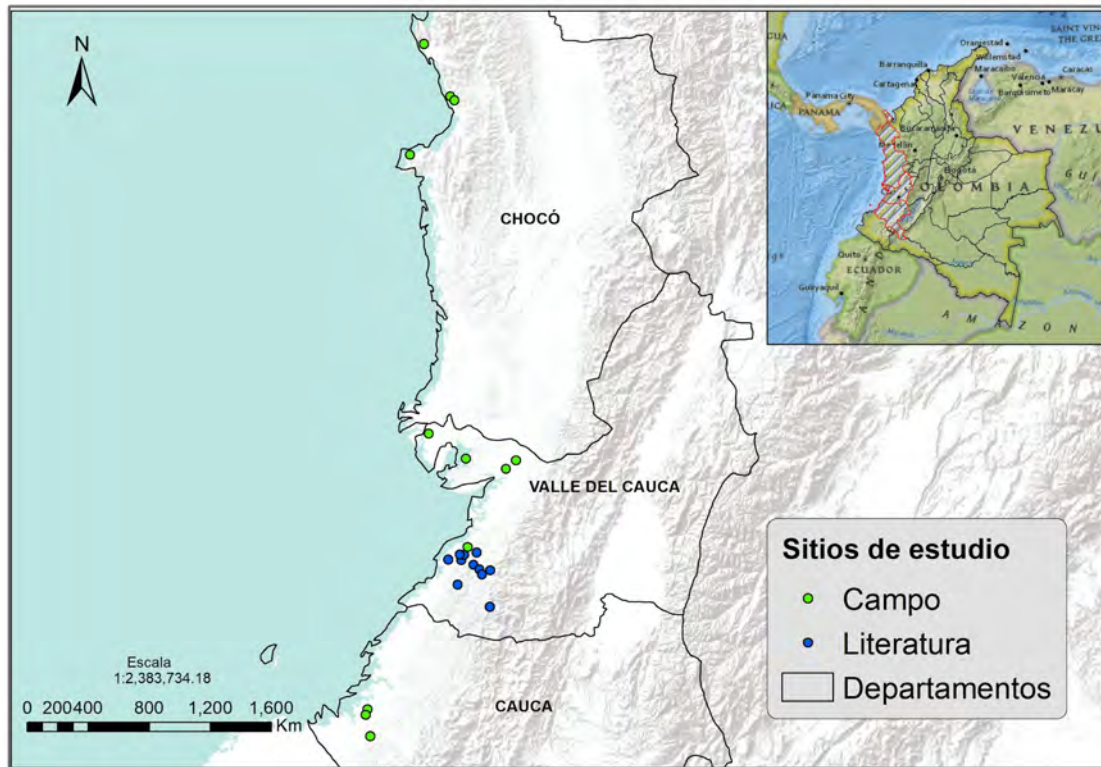


Figura 1. Mapa de sitios de estudio del proyecto principal, con información tomada en campo y literatura.

Desarrollo de la base de datos. Se utilizó Python y Google Colaboratory junto con los módulos pandas y pygpx, para manejar, transformar y concatenar archivos .xlsx y .gpx. Se fusionaron, usando la llave relacional en un DataFrame y se exportaron a un archivo consolidado en Excel, para la inserción de nuevos datos. Los datos se integraron en una base de datos de modelo relacional y se desarrollaron varios procedimientos, para asegurar que los valores fueran comparables entre todas las fuentes de información. Se generó un código de identificación único para los proyectos recopilados y se estandarizaron los sistemas de georreferenciación (Van Rossum, 1995; Google, 2023; McKinney, 2010; Leslie, 2022; Svob *et al.* 2014; Nakamura *et al.* 2021; Python Software Foundation, 2022; Coordinate Systems Worldwide, 2022).

La información taxonómica fue actualizada y estandarizada utilizando la API del GBIF (Chamberlain *et al.* 2022). La base de datos fue diseñada para gestionar dos tipos de proyectos: inventarios forestales y estudios ecológicos, implementando técnicas de control de calidad y transformación de datos en cinco formatos de archivo (.xlsx, .gpx, .docx, .shp y .pdf). La base de datos relacional fue implementada

utilizando PostgreSQL (PostgreSQL Global Development Group, 2022) y SQLAlchemy (Bayer, 2013), como se muestra en la figura 2.

La estructura final de la base de datos consta de 13 tablas relacionales divididas en dos grupos, siguiendo el modelo estrella, descrito por Svob *et al.* (2014), Giménez (2019) y Alberti & Massone (2022). El primer grupo está compuesto por las tablas que almacenan información general del proyecto y la localidad de muestreo, como projects, places e inventory_details. El segundo grupo de tablas se enfoca en almacenar información taxonómica y dasométrica, a nivel de individuo, así como información sobre experimentos ecológicos, genéticos y de propagación, incluyendo las tablas biodiversity_records, measurements, taxonomy_details, observations_details, collections, experiments, experiment_types y experiment_records. El diseño de las tablas se basó en llaves primarias y foráneas, para establecer relaciones entre las tablas, incluyendo las pautas de Chapman & Wieczorek (2022), para la correcta georreferenciación y Bayer (2013), para la gestión de la base de datos.

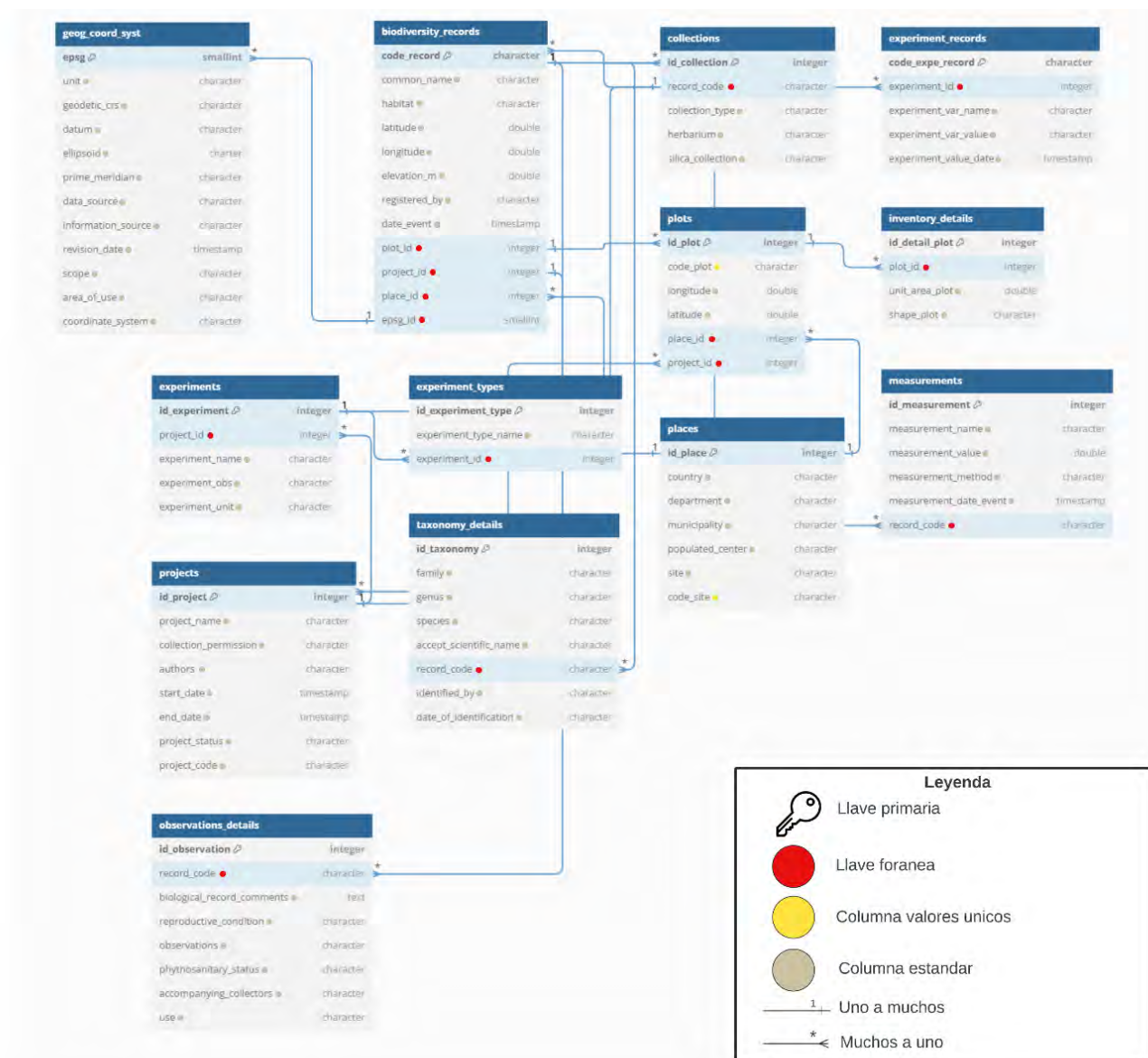


Figura 2. Diagrama entidad relación de las tablas presente en la base de datos.

Arquitectura de referencia para el laboratorio virtual. En este estudio, se utilizó la plataforma de código abierto Docker versión 19.03.8, sobre la distribución Ubuntu 22.10, usando el kernel Linux 5.19.0-29-generic, para la implementación del laboratorio virtual, mientras que los entornos de trabajo para los investigadores se generaron mediante el uso del software JupyterHub (Hu & Che, 2019; Andjarwirawan *et al.* 2020, Jupyter project, 2022a).

Por su parte, los Jupyter Notebooks son entornos de desarrollo interactivo basado en la web para el manejo de código y datos. La interfaz flexible de los notebooks permitió a los usuarios configurar y organizar sus flujos de trabajo de ciencia de datos, estadística y computación científica, tanto en Python como en R (R Development Core Team, 1993; Jupyter project, 2022b), permitiendo un flujo de trabajo estructurado y reproducible en cada uno de los procesos y análisis realizados a lo largo del proyecto, siguiendo las recomendaciones de Carneiro *et al.* (2018), Pimentel *et al.* (2019) y Beg *et al.* (2021).

Adicionalmente, se implementaron los servicios de Amazon Web Services (AWS), los cuales, brindan una visión unificada en torno a la captura, ingesta, almacenamiento y análisis de datos desarrollados en el laboratorio virtual (Coker *et al.* 2019). Durante la implementación del laboratorio virtual en AWS se utilizó Internet Gateway y Route 53, para permitir la conexión con el navegador web. Se estableció una Virtual Private Cloud (VPC) y se implementaron dos instancias Elastic Compute Cloud (EC2), para responder a las peticiones realizadas por el intérprete de órdenes seguro y el software TablePlus (Raccoon & Pham, 2022). También, se virtualizaron los contenedores mediante Elastic Container Service (ECS) y Fargate, y se usó Relational Database Service (RDS), para la base de datos PostgreSQL. Para el almacenamiento y distribución de los Notebooks se usó Elastic File System (EFS) y Simple Storage Service (S3), como repositorio para imágenes, documentos y resultados. La infraestructura fue monitoreada por CloudWatch, Config y se estableció el registro de acceso y privacidad con Identity

and Access Management (IAM) y Congnito. El laboratorio virtual ejecutó los servicios y aplicaciones, tal como se muestra en la figura 3.

Se evaluó el rendimiento de los notebooks en el servidor JupyterHub después de implementar la infraestructura del laboratorio virtual. Los temas abordados incluyen la depuración de datos, la creación de una base de datos en PostgreSQL a partir de archivos tabulares y

análisis geográfico, cada uno con dos notebooks en Python y el tema de diseño experimental con un solo notebook en R. Para facilitar la reproducibilidad y la colaboración se ha creado un repositorio en GitHub de libre acceso, que contiene todos los notebooks y recursos utilizados en este estudio https://github.com/juanpac96/virtual_laboratory_of_biodiversity.

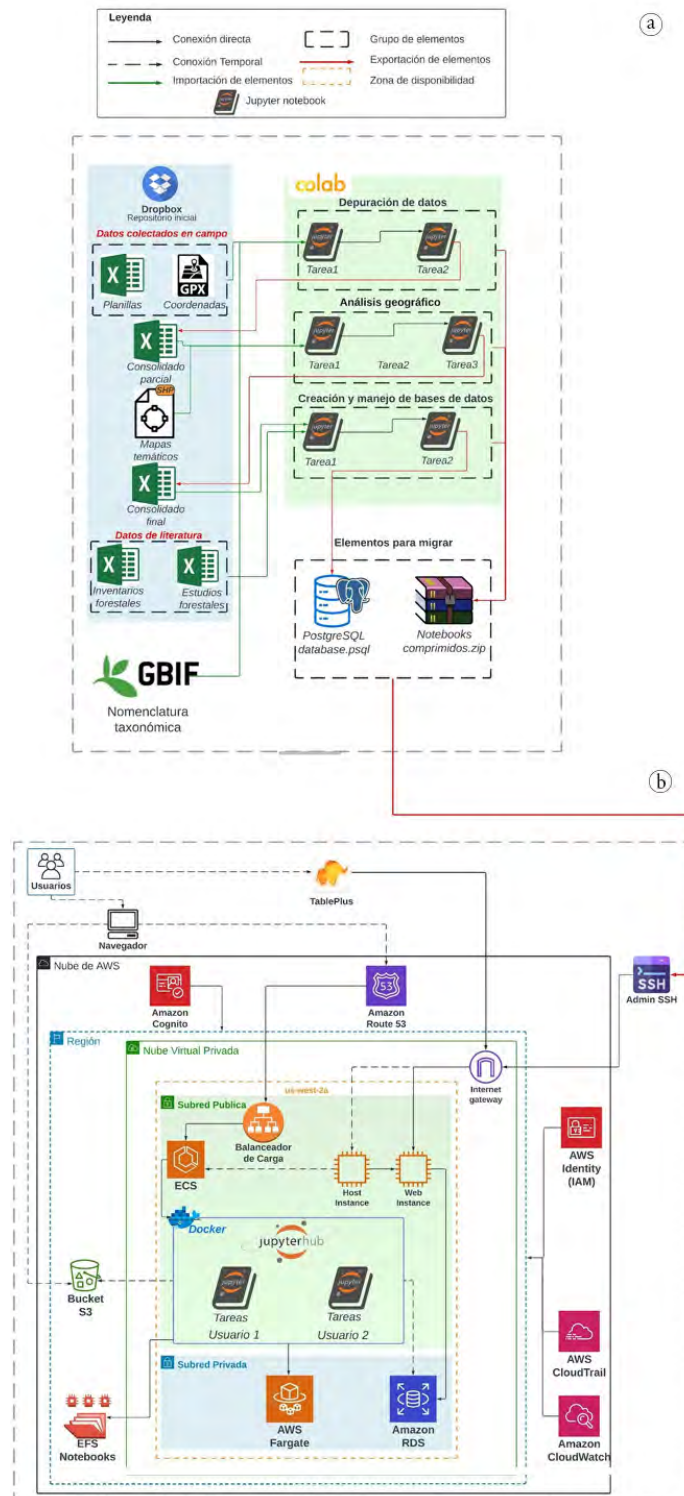


Figura 3. Infraestructura y procesos para el desarrollo del laboratorio virtual en la nube. a) procesos realizados fuera del laboratorio; b) procesos y servicios que forman el laboratorio virtual.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de la base de datos. Se logró poner en funcionamiento el laboratorio virtual para cinco usuarios, mediante la integración de una base de datos final en PostgreSQL, el motor de bases de datos TablePlus, la aplicación de JupyterHub virtualizada en un contenedor de Docker y los servicios de cómputo en la nube ofrecidos por AWS. Mientras tanto, la base de datos final contiene un total de 28.058 registros, compuestos por seis proyectos clasificados en dos inventarios forestales y cuatro estudios de investigación ecológica, realizados entre 2004 y 2022. El número de observaciones registradas por proyecto varía entre 130 a 18.575, siendo el proyecto cuatro el que posee mayor cantidad de registros, mientras que el proyecto seis posee la menor cantidad de observaciones. Un breve análisis de los registros colectados en los años en los que se realizaron los seis proyectos revela una alta concentración durante 2004 y 2008.

La base de datos cuenta con un total de 28.058 entradas, de las cuales, 26.117 corresponden a los inventarios forestales, mayormente documentando especímenes arbóreos, mientras que 1.941 entradas provienen de los estudios ecológicos. Se identificaron 128 especies pertenecientes a 104 géneros y 40 familias en los inventarios, mientras que en los estudios ecológicos se identificaron 91 especies, 49 géneros y 28 familias. En total, 21 especies fueron registradas, tanto en los inventarios como en los estudios ecológicos, mientras que 70 especies solo fueron registradas en los inventarios y 107 únicamente en los estudios ecológicos. Entre las familias con mayor número de especies registradas se encuentran Fabaceae, con 54 especies; Arecaceae, con 13 especies; Malvaceae, con 11 especies y Moraceae, con 10 especies. La base de datos contiene un total de 44 familias, 119 géneros y 198 especies registradas en cuanto a nomenclatura taxonómica. La descripción de los registros taxonómicos, a nivel de proyecto y base de datos, se puede visualizar en la tabla 1.

Tabla 1. Resumen de la información taxonómica forestal presente en la base de datos de tres departamentos del Pacífico colombiano.

Proyecto	Tipo	Familias	Géneros	Especies
1	Estudio	1	2	37
2	Estudio	5	5	5
3	Inventario	29	54	53
4	Inventario	35	82	91
5	Estudio	26	44	51
Base de datos		44	119	198

Control de calidad y validación de los datos taxonómicos.

En cuanto a la identificación taxonómica se puede apreciar un incremento en la identificación de los individuos cuando se transita del nivel de especie al de género, ya que se observó un aumento del 2,56 % en la cantidad de registros con géneros identificados, que abarcan un 63,25 % del total de registros, mientras que los individuos que alcanzaron a llegar al nivel de especies, representan el 60,69 % del total de registros en la base de datos, revelándose, también, que el mayor grado de identificación taxonómica fue realizado por los estudios ecológicos.

Para garantizar el control y la calidad de la base de datos, se implementaron medidas de restricción y validación en los datos ingresados en cada campo y fila de las tablas correspondientes. Dichas restricciones de fila incluyen: restricciones de valores únicos, condición del tipo de datos almacenados, controles de comparación de campos, codificación de valores de campo y encriptación de valores sensibles.

Con la ayuda de estos parámetros se reveló que la tabla con mayores presencias de errores fue la biodiversity_records, que detectó anomalías en las columnas de latitud, longitud, elevación, nombres comunes y fechas, debido a la presencia de caracteres especiales dentro del respectivo campo y la presencia de valores duplicados en la columna de los códigos de registros.

En menor medida, se detectaron errores en la columna de encargada del almacenamiento de los valores de las variables dasométricas de la tabla measurements, concentrándose en mayor media en las variables de altura total, altura comercial, diámetro a la altura del pecho (DAP) y se caracterizaban por el uso de caracteres especiales y errores de toma de valores en campo. Para el resto de las once tablas no se detectó ninguna violación a las restricciones implementadas. La información general de las tablas que forman la base de datos de este estudio se puede observar en la tabla 2.

De manera global, las restricciones y las condiciones en la tabla de tipo de datos, valores nulos y duplicación de datos ayudaron a detectar errores de digitación en planillas de campo e información suministradas por los inventarios forestales y estudios ecológicos. Adicionalmente, con el uso del software TablePlus y en paralelo con Python, se ejecutan consultas de lenguaje SQL en la búsqueda de incoherencias en las variables dasométricas, taxonómicas y espaciales, gastando un promedio de 0,641 segundos por consulta.

Para ilustrar la utilidad de la base de datos se realizó un análisis simple de la ocurrencia de especies, consultando la base de datos, donde se encontró que las tres especies de mayor ocurrencia registradas por los estudios ecológicos son: *Carapa guianensis*, con 17,48 %; *Humiriastrum procerum*, con 11,91 % y *Magnolia calimaensis*, con el 4,42 %, mientras que en los inventarios forestales,

las tres especies más abundantes son: *Euterpe cuatrecasana*, con 15,69 %; *Rhizophora harrisonii*, con 2,66 % e *Inga edulis*, con el 2,46 %, de los 26.117 registros suministrados por los inventarios forestales. Por su parte, las variables dasométricas presentaron un comportamiento diferente en la distribución de las observaciones en la variables, puesto que no todas las variables contempladas en la base de datos están presentes en todos los proyectos, tal es el caso de la variable diámetro de copa, que presentan un bajo número de 431

observaciones, pues solo fueron contempladas por los estudios 1 y 2, mientras que la variable DAP se distribuye entre las magnitudes de 5 a 80 cm, en donde se puede observar que las tres variables poseen histogramas sesgados positivamente. En el mismo sentido, la distribución de las observaciones para la altura total y altura comercial se da entre el orden de los 0,5 a los 40 m, con tendencia a una distribución normal.

Tabla 2. Descripción general de las tablas presentes en la base de datos.

Serial	Nombre de la tabla	Descripción	Datos
1	experiments	2 filas y 5 columnas	Entero, Texto
2	plots	1.908 filas y 6 columnas	Entero, Decimal, Texto
3	measurements	76.627 filas y 6 columnas	Entero, Decimal, Fecha, Texto
4	inventory_details	1.908 filas y 5 columnas	Entero, Decimal, Texto
5	observations_details	26.437 filas y 8 columnas	Entero, Texto
6	places	29 filas y 7 columnas	Entero, Texto
7	collections	473 filas y 5 columnas	Entero, Texto
8	experiment_types	2 filas y 3 columnas	Entero, Texto
9	geog_coord_syst	2 filas y 12 columnas	Entero, Fecha, Texto
10	experiment_records	1.060 filas y 6 columnas	Entero, Fecha, Texto
11	projects	6 filas y 8 columnas	Entero, Fecha, Texto
12	biodiversity_records	26.998 filas y 12 columnas	Decimal, Fecha, Entero, Decimal, Texto
13	taxonomy_details	17.078 filas y 8 columnas	Entero, Texto

Evaluación de las capacidades del ambiente de desarrollo. Una vez realizada y depurada la base de datos se procedió a desplegar el servidor de JupyterHub del laboratorio virtual en fase de prueba, con un personal de cinco investigadores y un contenedor en Docker, mediante el uso de los servicios de orquestación de contenedores ECS y AWS Fargate. Con el servidor de JupyterHub en funcionamiento se procedió a ejecutar todos los notebooks migrados de Google Colaboratory dentro del entorno de JupyterHub, para realizar una comparativa entre el tiempo de ejecución y el porcentaje de memoria RAM usada por cada plataforma, tal como se ve en la tabla 3. El promedio del tiempo de los notebooks ejecutados en Google Colaboratory es de 06min:02seg, con una desviación estándar de $\pm$ 03min:58seg, mientras que en el servidor de JupyterHub se obtuvo un tiempo de ejecución promedio de 04min:18seg, con una desviación estándar de $\pm$ 03min:48seg, observándose un mejor rendimiento en los notebooks ejecutados en JupyterHub, debido a que las librerías usadas para el análisis geográfico y conexión a la infraestructura del GBIF de cada ambiente de trabajo vienen instaladas, por defecto, desde la configuración del servidor y no es tarea del usuario.

Por el contrario, en la plataforma de Google Colaboratory se debe instalar dichas librerías, cada vez que se requiera ejecutar un notebook para realizar cualquier tarea relacionadas con estas

librerías y deben ser instaladas por el usuario, lo que generó un aumento en el tiempo de ejecución considerablemente.

Para el componente de memoria RAM no se registró un cambio significativo, ya que el porcentaje de uso promedio de dicho componente fue de 8,48 %, de un total 12 GB disponibles en cada plataforma, al momento de la evaluación de cada notebook, lo que indicó que los códigos usados en cada tarea no son muy demandantes de recursos computacionales. El objetivo del Notebook relacionado con el tema del diseño experimental, ejecutado con el lenguaje de programación R, fue verificar su compatibilidad con el software JupyterHub. Los resultados obtenidos fueron tiempos de ejecución de 1 minuto y 10 segundos, con un consumo de RAM del 8,2 %, lo que indica que este software puede ser útil para futuros proyectos que requieran el uso simultáneo de más de un lenguaje de programación.

Análisis y discusión del rendimiento en el laboratorio virtual. A continuación, se llevó a cabo un análisis del rendimiento del laboratorio virtual, evaluado a través de dos métricas clave: tiempo de respuesta y uso de memoria RAM. Se compararon dos plataformas de desarrollo, Google Colaboratory y JupyterHub y se encontró que el tiempo de respuesta fue similar en ambas, pero JupyterHub requiere un poco más de memoria RAM. Los tiempos de ejecución de los notebooks variaron entre 1:30 minutos y 11:00 minutos, lo

que proporciona un amplio margen de tiempo para llevar a cabo tareas y análisis, permitiendo una mayor flexibilidad y escalabilidad. Los resultados indican que la interactividad y la reproducibilidad son propiedades importantes del laboratorio virtual. Con relación a los servicios EC2 y RDS se registraron métricas, como tiempo de respuesta de 200 ms, uso de CPU del 30 % y RAM 50 %, junto

a un tráfico de red alrededor de 0,1 GB/s. En el caso de ECS, el tiempo de inicio y detención del contenedor fue de 10 y 5 segundos, respectivamente. En AWS Fargate, se observó un uso promedio de CPU y RAM del 80 % y 75 %, respectivamente. Finalmente, en el servicio S3 se almacenaron 4 GB de objetos, con tiempos de respuesta inferiores a 100 ms.

Tabla 3. Comparación del comportamiento de los notebooks entre las dos plataformas de desarrollo.

Tema	Notebook	Tiempo Colab	RAM Colab	Tiempo JupyterHub	RAM JupyterHub
Depuración de datos	1_Transformation_templates_filed_data.ipynb	01:38	7,95	01:38	7,95
	2_Cluster_dendrological_records.ipynb	03:38	8,45	01:38	8,45
Análisis geográfico	1_Sampling_sites.ipynb	10:44	8,13	07:41	8,13
	2_Working_with_elevations.ipynb	05:57	8,9	01:28	8,9
Creación y manejo de base de datos	1_From_Excel_To_Databases.ipynb	03:21	5,97	03:00	5,97
	2_Update_database_records.ipynb	11:00	11,51	10:23	11,51

Nota: Tabla resumen entre las plataformas Google Colaboratory y JupyterHub de los tiempos en minutos y segundos junto con el porcentaje (%) de uso en memoria RAM.

El laboratorio virtual desarrollado en este estudio permitió la recopilación y el análisis de grandes conjuntos de datos sobre biodiversidad, apoyando la idea de que la combinación de datos a diferentes escalas permite un seguimiento más completo en el espacio y en el tiempo, identificando patrones y tendencias en la distribución de especies (Hernandez *et al.* 2022). Estudios recientes, como los realizados por Pöttker *et al.* (2023), han demostrado la eficacia de utilizar la librería Keras de TensorFlow con Python para entrenar redes neuronales convolucionales (CNNs) en la clasificación de comunidades vegetales, a partir de imágenes multiespectrales. De manera similar, nuestro estudio también utilizó Python, pero se enfocó en procesar y analizar datos de una base de datos en PostgreSQL con librerías, como Pandas y Sqlalchemy; mientras que Pöttker *et al.* (2023) aplicaron Python para el análisis espacial avanzado y la identificación de patrones fenológicos, nuestro enfoque se centró en la gestión y análisis de grandes conjuntos de datos taxonómicos, provenientes de exploraciones de campo. Ambos enfoques resaltan la versatilidad y potencia de Python en el análisis de datos ecológicos.

En este estudio se destaca la eficacia de las plataformas de computación en la nube para el procesamiento de grandes volúmenes de datos ecológicos. Kovács *et al.* (2023) utilizaron Google Earth Engine (GEE) para generar mapas globales de características de vegetación, logrando tiempos de reconstrucción temporal de 20-30 segundos. Con el empleo de AWS y JupyterHub se logró un tiempo promedio de ejecución de notebooks de 04:18 minutos, en comparación con 06:02 minutos en Google Colaboratory. La diferencia en los tiempos de procesamiento se debe a que GEE está optimizado para el análisis y la visualización de datos

geoespaciales, permitiendo una integración eficiente con grandes conjuntos de datos satelitales; en cambio, Google Colaboratory es una plataforma general de notebooks basada en la nube, que requiere la instalación manual de bibliotecas para cada ejecución, lo que aumenta el tiempo de procesamiento. Aunque el enfoque no utilizó GEE, la combinación de JupyterHub y AWS proporcionó un entorno personalizado y optimizado para la gestión de datos específicos, destacando la flexibilidad y la eficiencia en la ejecución de análisis complejos y la gestión de grandes volúmenes de datos.

Asimismo, se destaca la importancia del monitoreo de bosques tropicales utilizando tecnologías avanzadas y análisis de datos. Tanto en este estudio como el de Roberts *et al.* (2022), se empleó Python para el procesamiento y análisis, integrando múltiples fuentes de información, lo que permite una respuesta rápida ante eventos de deforestación y degradación de bosques, facilitando la conservación en áreas críticas de Colombia.

En general, los estudios en la literatura enfatizan la importancia de adoptar un enfoque holístico para estudiar la biodiversidad, uno que incorpore datos de múltiples fuentes y disciplinas para proporcionar una comprensión más completa del mundo natural. Aprovechando tecnologías avanzadas, como el aprendizaje automático, la teledetección y el análisis de datos, los investigadores pueden desarrollar estrategias efectivas para conservar la biodiversidad y mitigar los impactos del cambio climático (Agrillo *et al.* 2021; Li *et al.* 2021; Musvuugwa *et al.* 2021). A pesar de los desafíos y debilidades, la computación en la nube y la ciencia de datos se están convirtiendo en herramientas comunes para el desarrollo de nuevo conocimiento (Borowiec *et al.* 2022).

Una de las limitaciones de este estudio es que no se probaron todos los servicios presentes en la AWS, ni se usaron otros proveedores de servicios en la nube, como Google, Oracle o Azure de Microsoft, para poder comparar cuál es el más eficiente o preciso. Además, la arquitectura aquí presente no representa una solución definitiva y cualquier otro investigador puede añadir o eliminar servicios y herramientas, según sus necesidades específicas. Proponer futuras investigaciones que exploren la eficacia de diferentes proveedores de servicios en la nube y ajusten la arquitectura del laboratorio virtual, según los requisitos específicos de cada estudio, sería beneficioso.

En el futuro, se espera la combinación de datos de diversas fuentes, como imágenes (Arechiga *et al.* 2022), datos moleculares (Triana-Vallejos *et al.* 2022), sensores de movimiento/ubicación (Wägele *et al.* 2022) y observaciones sobre servicios ecosistémicos (García-López *et al.* 2022).

Agradecimientos: A la Universidad del Tolima, al Ministerio de Ciencia Tecnología e Innovación y al Centro Forestal Tropical Pedro Antonio Pineda. **Conflicto de intereses:** El artículo fue preparado y revisado con la participación de todos los autores, quienes declaramos que no existe conflicto de intereses que ponga en riesgo la validez de los resultados presentados. **Financiación:** Este estudio fue financiado bajo el proyecto 80740-484-2020, como beneficiario de la Convocatoria 852 de 2019 del Ministerio de Ciencia Tecnología e Innovación. **Contribución autores:** Juan Pablo Cuevas-Gonzalez, conceptualización, análisis formal, desarrollo de la investigación, metodología, procesamiento de datos, escritura, revisión y edición del documento. Fernando Fernandez-Mendez, desarrollo de la investigación, metodología, administración, adquisición y manejo de los recursos, procesamiento de datos, escritura, revisión y edición del documento. Kelly T. Bocanegra-González, conceptualización, análisis formal, desarrollo de la investigación, metodología, procesamiento de datos, escritura, revisión y edición del documento.

REFERENCIAS

- AGRILLO, E.; FILIPPONI, F.; PEZZAROSSA, A.; CASELLA, L.; SMIRAGLIA, D.; ORASI, A.; ATTORRE, F.; TARAMELLI, A. 2021. Earth observation and biodiversity big data for forest habitat types classification and mapping. *Remote Sensing*. 13(7):1231. <https://doi.org/10.3390/rs13071231>
- ALBERTI, J.; MASSONE, O. 2022. Tired of losing valuable data? Build your lab ecological database as a cornerstone for long-term approaches. *Ecología Austral*. 32(1):151-157. <https://doi.org/10.25260/ea.22.32.1.0.1785>
- ARECHIGA, J.; ESQUIVEL, T.; CAMACHO, A.; DELGADO-RODRÍGUEZ, M.R.; VARGAS-GONZÁLEZ, P.; QUIJAS, S. 2022. Floristic and structural diversity of riparian vegetation along an urban-natural gradient of Pitillal River Jalisco, México. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*. 25(1):e2196. <https://doi.org/10.31910/rudca.v25.nSupl.1.2022.2196>
- ANDJARWIRAWAN, J.; NOVIANUS, P.H.; KURNIAWAN, A. 2020. Computer science laboratory environment using docker. 1-6. Disponible desde Internet en: https://repository.petra.ac.id/18698/1/Publikasi1_98031_5989.pdf
- BART, A.; FAZLIEV, A.; GORDOV, E.; OKLADNIKOV, I.; PRIVEZENTSEV, A.; TITOV, A. 2018. Virtual research environment for regional climatic processes analysis: Ontological approach to spatial data systematization. *Data Science Journal*. 17:14 <https://doi.org/10.5334/dsj-2018-014>
- BAYER, M. 2013. SQLAlchemy. En: Brown, A.; Wilson, G. (eds.), *The architecture of open source applications*. Volume II. University of California Berkeley p.291-314. Disponible desde Internet en: <http://software-carpentry.org/2011/05/06/%0Ahttps://aosabook.org/en/sqlalchemy.html>
- BEG, M.; TAKA, J.; KLUYVER, T.; KONOVALOV, A.; RAGAN-KELLEY, M.; THIERY, N.M.; FANGOHR, H. 2021. Using Jupyter for Reproducible Scientific Workflows. *Computing in Science and Engineering*. 23(2):36-46. <https://doi.org/10.1109/MCSE.2021.3052101>
- BOCANEGRA-GONZÁLEZ, K.; GUILLEMIN, M.L. 2018. Guidelines for the restoration of the tropical timber tree *Anacardium excelsum*: first input from genetic data. *Tree Genetics and Genomes*. 14(59). <https://doi.org/10.1007/s11295-018-1271-z>
- BOROWIEC, M.L.; DIKOW, R.B.; FRANDSEN, P.B.; MCKEEN, A.; VALENTINI, G.; WHITE, A.E. 2022. Deep learning as a tool for ecology and evolution. In *Methods in Ecology and Evolution*. 13(8):1640-1660. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13901>
- CARNEIRO, T.; DA NOBREGA, R.V.M.; NEPOMUCENO, T.; BIAN, G. BIN; DE ALBUQUERQUE, V.H.C.; FILHO, P.P.R. 2018. Performance Analysis of Google Colaboratory as a Tool for Accelerating Deep Learning Applications. *IEEE* 6:61677-61685. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2874767>
- CHAMBERLAIN, S.; FORKEL, R.; LEGIND, J.; HOEY, S.V.; DESMET, P.; NOÉ, N. 2022. pygbif. Disponible desde Internet en: <https://github.com/gbif/pygbif>
- CHAPMAN, A.D.; WIECZOREK, J.R. 2022. Guía de buenas prácticas de georreferenciación. <https://doi.org/10.15468/doc-gg7h-s853>
- CHEN, F.; HU, Y. 2021. Agricultural and rural ecological management system based on big data in complex system. *Environmental Technology and Innovation*. 22:101390. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101390>

- COKER, S.; ATNOOR, D.; BUCKNER, P. 2019. Building the foundation for lab of the future using AWS. Disponible desde Internet en: <https://aws.amazon.com/blogs/industries/building-the-foundation-for-lab-of-the-future-using-aws/>
- COOPER, D.H.; NOONAN-MOONEY, K. 2013. Convention on Biological Diversity. En: Levin, S. Encyclopedia of Biodiversity. Segunda edición. Academic Press. p.306-319. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384719-5.00418-4>
- COORDINATE SYSTEMS WORLDWIDE. 2022. WGS 84 - WGS84 - World Geodetic System 1984. used in GPS. Disponible desde Internet en: <https://epsg.io/4326>
- DAVENPORT, T.; PRUSAK, L. 1998. Working knowledge: how organizations manage what they know. Choice Reviews Online. 35(09):5167. <https://doi.org/10.5860/choice.35-5167>
- DEVICTOR, V.; BENSANDE-VINCENT, B. 2016. From ecological records to big data: the invention of global biodiversity. History and Philosophy of the Life Sciences. 38:13. <https://doi.org/10.1007/s40656-016-0113-2>
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, FAO. 2022. El tratado internacional sobre los recursos fitogenéticos para la alimentación y la agricultura. Disponible desde Internet en: <http://extwprlegs1.fao.org/treaty/docs/tre000005S.pdf>
- FORESTPLOTS.NET. 2020. ForestPlots.NET. Disponible desde Internet en: <https://www.forestplots.net/>
- GARCÍA-LÓPEZ, Y.; GONZÁLEZ-SÁEZ, L.Y.; CABRERA-HERNÁNDEZ, A.J. 2022. Aplicaciones de aprendizaje automático para el análisis industrial de la provisión azucarera en Matanzas, Cuba. Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica. 25(2):1-10. <https://doi.org/10.31910/rudca.v25.n2.2022.2334>
- GLOBAL BIODIVERSITY INFORMATION FACILITY, GBIF. 2020. Global Biodiversity Information Facility. Disponible desde Internet en: <https://www.gbif.org/>
- GLOBAL BIODIVERSITY INFORMATION FACILITY, GBIF. 2022. Introducción a GBIF Tabla de Contenido. Disponible desde Internet en: <https://docs.gbif.org/course-introduction-to-gbif/es/introduccion-a-gbif.es.pdf>
- GENTRY, A. 1996. A Field Guide the Families and Genera Woody Plants of Northwest South America (Colombia, Ecuador, Peru). University of Chicago. 920p.
- GIMÉNEZ, J.A. 2019. Buenas prácticas en el diseño de bases de datos. Revista Científica Internacional ARANDU UTIC. 6:193-210.
- GOOGLE. 2023. Google Colaboratory. Disponible desde Internet en: <https://colab.research.google.com/>
- GRATTAROLA, F.; BOTTO, G.; DA ROSA, I.; GOBEL, N.; GONZÁLEZ, E.M.; GONZÁLEZ, J.; HERNÁNDEZ, D.; LAUFER, G.; MANEYRO, R.; MARTÍNEZ-LANFRANCO, J.A.; NAYA, D.E.; RODALES, A.L.; ZIEGLER, L.; PINCHEIRA-DONOSO, D. 2019. Biodiversidata: An open-access biodiversity database for Uruguay. Biodiversity Data Journal. 7:e36226 <https://doi.org/10.3897/BDJ.7.e36226>
- GROUP ON EARTH OBSERVATION, GEO. 2015. Strategic Plan 2016-2025: Implementing GEOSS. Disponible desde Internet en: https://www.earthobservations.org/documents/GEO_Strategic_Plan_2016_2025_Implementing_GEOSS.pdf
- HAMPTON, S.E.; STRASSER, C.A.; TEWKSURY, J.J.; GRAM, W.K.; BUDDEN, A.E.; BATCHELLER, A.L.; DUKE, C.S.; PORTER, J.H. 2013. Big data and the future of ecology. Frontiers in Ecology and the Environment. 11(3):156-162. <https://doi.org/10.1890/120103>
- HERNANDEZ, L.; ÁLVAREZ-MARTÍNEZ, J.M.; GÓMEZ ALMARAZ, C.; SÁNCHEZ DE DIOS, R.; JÍMENEZ ALFARO, B.; ÁLVAREZ-TABOADA, F. 2022. Seguimiento de la biodiversidad en la era del Big Data. Ecosistemas. 31(3). <https://doi.org/10.7818/ECOS.2450>
- HU, F.; CHE, S. 2019. Establishment of the Docker-Based Laboratory Environment. Open Access Library Journal. 6:e5519. <https://doi.org/10.4236/oalib.1105519>
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, IPCC. 2019. El IPCC y el sexto ciclo de evaluación. Disponible desde Internet en: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/09/AC6_brochure_es.pdf
- JUPYTER PROJECT. 2022a. Jupyterhub: A multi-user version of the notebook designed for companies, classrooms and research labs. Disponible desde Internet en: <https://jupyter.org/>
- JUPYTER PROJECT. 2022b. Jupyter Notebook: The classic notebook interface. Disponible desde Internet en: <https://jupyter.org/>
- KOVÁCS, D.D.; REYES-MUÑOZ, P.; SALINERO-DELGADO, M.; MÉSZÁROS, V.I.; BERGER, K.; VERRELST, J. 2023. Cloud-free global maps of essential vegetation traits processed from the TOA Sentinel-3 catalogue in Google Earth Engine. Remote Sensing. 15(13). <https://doi.org/10.3390/rs15133404>
- LESLIE, B. 2022. Pygpx. Disponible desde Internet en: <https://github.com/foxgear/pygpx>

- LI, R.; RANIPETA, A.; WILSHIRE, J.; MALCZYK, J.; DUONG, M.; GURALNICK, R.; WILSON, A.; JETZ, W. 2021. A cloud-based toolbox for the versatile environmental annotation of biodiversity data. *PLoS Biology*. 19(11). <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3001460>
- MCKINNEY, W. 2010. Data Structures for Statistical Computing in Python. *Proceedings of the 9th Python in Science Conference*. 1:56-61. <https://doi.org/10.25080/majora-92bf1922-00a>
- MELO, O.A.; VARGAS, R. 2003. Evaluación ecológica y silvicultural de ecosistemas boscosos. Universidad del Tolima, CRG, carder, corpocaldas, cortolima. Ibagué, Colombia. p.222
- MUÑOZ, D.A.; DUEÑAS, M.C.; VILLEGAS, X.F.; MURCIA, U.G.; URIBE, C.; ARIAS, L.; SIERRA, P.; HERRERA, I.; CASTRO, W.; HERNÁNDEZ, V.; BENAVIDES, J. 2007. Sistema de información ambiental de Colombia-SIAC Marco Conceptual del SIAC: Aplicación del enfoque ecosistémico. 1-197. Disponible desde Internet en: <https://www.siac.gov.co/portal/default.aspx>
- MUSVUUGWA, T.; DLOMU, M.G.; ADEBOWALE, A. 2021. Big data in biodiversity science: A framework for engagement. *Technologies*. 9(3):60. <https://doi.org/10.3390/technologies9030060>
- NAKAMURA, K.; HORI, K.; HIROSE, S. 2021. Algebraic fault analysis of sha-256 compression function and its application. *Information*. 12(10):433. <https://doi.org/10.3390/info12100433>
- NOREÑA-P, A.; GONZÁLEZ MUÑOZ, A.; MOSQUERA-RENDÓN, J.; BOTERO, K.; CRISTANCHO, M.A. 2018. Colombia, an unknown genetic diversity in the era of Big Data. *BMC Genomics*. 19:859. <https://doi.org/10.1186/s12864-018-5194-8>
- ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS, ONU. 1998. Protocolo de Kyoto de la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático. 24p.
- ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS, ONU. 2018. La Agenda 2030 y los objetivos de desarrollo sostenible una oportunidad para América Latina y el Caribe. Naciones Unidas. 89p. Disponible desde Internet en: https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/40155/24/S1801141_es.pdf
- PIMENTEL, J.F.; MURTA, L.; BRAGANHOLO, V.; FREIRE, J. 2019. A large-scale study about quality and reproducibility of jupyter notebooks. *IEEE International Working Conference on Mining Software Repositories*. 507-517. <https://doi.org/10.1109/MSR.2019.00077>
- POSTGRES GLOBAL DEVELOPMENT GROUP. 2022. PostgreSQL 13.3. Disponible desde Internet en: <https://www.postgresql.org>
- PÖTTKER, M.; KIEHL, K.; JARMER, T.; TRAUTZ, D. 2023. Convolutional neural network maps plant communities in semi-natural grasslands using multispectral unmanned aerial vehicle imagery. *Remote Sensing*. 15(7). <https://doi.org/10.3390/rs15071945>
- PYTHON SOFTWARE FOUNDATION. 2022. cpython. Disponible desde Internet en: <https://github.com/python/cpython/tree/3.10>
- RACCOON, T.; PHAM, H. 2022. TablePlus. Disponible desde Internet en: <https://tableplus.com/>
- ROBERTS, J.F.; MWANGI, R.; MUKABI, F.; NJUI, J.; NZIOKA, K.; NDAMBIRI, J.K.; BISPO, P.C.; ESPIRITO-SANTO, F.D.B.; GOU, Y.; JOHNSON, S.C.M.; LOUIS, V.; RODRIGUEZ-VEIGA, P.; TANSEY, K.; UPTON, C.; ROBB, C.; BALZTER, H. 2022. Pyeo: A Python package for near-real-time forest cover change detection from Earth observation using machine learning. *Computers and Geosciences*. 167:105192. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2022.105192>
- R DEVELOPMENT CORE TEAM. 1993. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Disponible desde Internet en: <https://www.R-project.org/>
- SENTERRE, B.; WAGNER, M. 2016. Standardization of data collection and creation of a biodiversity database: a PostgreSQL-PostGIS database for Island Conservation Society (Seychelles). <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.10370.27844>
- SHIN, D.H.; CHOI, M. 2015. Ecological views of big data: Perspectives and issues. *Telematics and Informatics*. 32(2):311-320. <https://doi.org/10.1016/j.tele.2014.09.006>
- SIERRA, C.A.; MAHECHA, M.; POVEDA, G.; ÁLVAREZ-DÁVILA, E.; GUTIERREZ-VELEZ, V.H.; REU, B.; FEILHAUER, H.; ANÁYA, J.; ARMENTERAS, D.; BENAVIDES, A.M.; BUENDIA, C.; DUQUE, Á.; ESTUPIÑAN-SUAREZ, L.M.; GONZÁLEZ, C.; GONZALEZ-CARO, S.; JIMENEZ, R.; KRAEMER, G.; LONDOÑO, M.C.; ORREGO, S.A.; SKOWRONEK, S. 2017. Monitoring ecological change during rapid socio-economic and political transitions: Colombian ecosystems in the post-conflict era. *Environmental Science and Policy*. 76:40-49. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.06.011>
- SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE BIODIVERSIDAD DE COLOMBIA, SIB. 2017. Crear compartir transformar. Una guía con herramientas para comprender y participar en

- las dinámicas del acceso abierto. SiB Colombia. Disponible desde Internet en: <http://www.sibcolombia.net/nosotros/acceso-abierto/ABC.pdf%0A>
- SOLTIS, D.E.; SOLTIS, P.S. 2016. Mobilizing and integrating big data in studies of spatial and phylogenetic patterns of biodiversity. *Plant Diversity*. 38(6):264-270. <https://doi.org/10.1016/j.pld.2016.12.001>
- SVOB, S.; ARROYO, J.P.; KALACSKA, M. 2014. The development of a forestry geodatabase for natural forest management plans in Costa Rica. *Forest Ecology and Management*. 327:240-250. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.05.024>
- TRIANA-VALLEJOS, J.A.; BAILÓN-AIJÓN, C.; CIFUENTES-CASTELLANOS, J.M. 2022. Morphological description and molecular characterization of fungi associated with the root of *Masdevallia coccinea* Linden ex Lindl. *Revista U.D.C.A Actualidad and Divulgacion Cientifica*. 25(1):e2098. <https://doi.org/10.31910/rudca.v25.n1.2022.2098>
- VAN ROSSUM, G. 1995. Python tutorial, Technical Report CS-R9526. Centrum Voor Wiskunde En Informatica (CWI). Disponible desde Internet en: <https://ir.cwi.nl/pub/5007/05007D.pdf>
- WÄGELE, J.W.; BODESHEIM, P.; BOURLAT, S.J.; DENZLER, J.; DIEPENBROEK, M.; FONSECA, V.; FROMMOLT, K.H.; GEIGER, M.F.; GEMEINHOLZER, B.; GLÖCKNER, F.O.; HAUCKE, T.; KIRSE, A.; KÖLPIN, A.; KOSTADINOV, I.; KÜHL, H.S.; KURTH, F.; LASSECK, M.; LIEDKE, S.; LOSCH, F.; WILDERMANN, S. 2022. Towards a multisensor station for automated biodiversity monitoring. *Basic and Applied Ecology*. 59:105-138. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2022.01.003>

Identificación inmunohistoquímica de las citoqueratinas 14 y 19 durante el desarrollo dental

Immunohistochemical identification of cytokeratin 14 and 19 during dental development

Kevin Díaz-Rojas¹ ; Víctor Simancas-Escorcía^{1,2*} 

¹Universidad de Cartagena, Grupo de Investigación GITOU. Cartagena de indias - Bolívar, Colombia; e-mail: kdiazr2@unicartagena.edu.co

²Universidad del Sinú, sede Cartagena, Grupo de investigación GENOMA. Cartagena de Indias - Bolívar, Colombia; e-mail: victor.simancas@unisnu.edu.co

*autor de correspondencia: victor.simancas@unisnu.edu.co

Cómo citar: Díaz-Rojas, K.; Simancas-Escorcía, V. 2024. Identificación inmunohistoquímica de las citoqueratinas 14 y 19 durante el desarrollo dental. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 27(2):e2486. <http://doi.org/10.31910/rudca.v27.n2.2024.2486>

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 24 de 2023

Aceptado: julio 16 de 2024

Editado por: Helber Adrián Arévalo Maldonado

RESUMEN

La formación de los dientes tiene gran importancia en la vida animal gracias a funciones, como la alimentación, la fonética o el ataque-defensa. La biomineralización fisiológica del desarrollo del órgano dental correspondiente al incisivo, diente de crecimiento continuo en ratones, constituye un modelo de investigación, que permite comprender los procesos involucrados en la formación de los tejidos mineralizados dentarios (esmalte y dentina) y periodontales (cemento y hueso alveolar). En estos procesos, pocos comprendidos fisiológicamente, participan epitelioцитos y filamentos intermedios de citoqueratinas (CK). Actualmente, el conocimiento sobre la identificación, la distribución y la participación de las CK durante la odontogénesis, particularmente, las CK19 y CK14, es escaso. Por ello, el objetivo del presente trabajo fue identificar y describir la expresión inmunohistoquímica de CK 19 y 14 durante el desarrollo dental. Para ello, se analizaron 12 incisivos de crecimiento continuo de ratones macho Swiss WT (Janvier, St Berthevin), de 7 días de nacidos. El estudio comprendió un análisis inmunohistoquímico con anticuerpos primarios monoclonales de conejo anti-CK 14 y anti-CK 19. Las observaciones se realizaron en un microscopio Leica DM6. Los resultados muestran que la CK19 se localiza en la lámina dental, las células del asa cervical y de la pulpa dental, mientras que la CK14, se localiza, esencialmente, en la lámina dental, ameloblastos y dentinoblastos. Se recomiendan futuros análisis inmunohistoquímicos (CK19/CK14) en ratones transgénicos, con el propósito de lograr una mayor comprensión de la función de estas CK, durante la formación dental.

Palabras clave: Citoqueratina; Desarrollo dental; Formación de tejidos; Inmunohistoquímica; Ratón.

ABSTRACT

Tooth formation is essential in animal life due to feeding, phonetics, or attack-defense functions. The physiological biomineralization of the dental organ development corresponding to the incisor, a continuously growing tooth in mice, constitutes a research model that allows an understanding of the processes involved in the formation of mineralized dental tissues (enamel and dentin) and periodontal tissues (cementum and alveolar bone). In these processes, which are poorly understood physiologically, epithelial cells and intermediate filaments of cytokeratins (CK) participate. Knowledge about the identification, distribution, and participation of CKs during odontogenesis, particularly CK19 and CK14, is scarce. Therefore, this study aimed to identify and describe the immunohistochemical expression of CK19 and CK14 during dental development. For this purpose, 12 continuously growing incisors from 7-day-old male Swiss WT mice (Janvier, St Berthevin) were analyzed. The study included an immunohistochemical analysis with primary monoclonal rabbit antibodies anti-CK14 and anti-CK19. Observations were made using a Leica DM6 microscope. The results show that CK19 is localized in the dental lamina, cervical loop cells, and dental pulp, while CK14 is essentially localized in the dental lamina, ameloblasts, and dentinoblasts. Future immunohistochemical analyses (CK19/CK14) in transgenic mice are recommended to better understand these CKs' function during dental formation.

Keywords: Cytokeratin; Dental development; Immunohistochemistry; Mouse; Tissue formation.

INTRODUCCIÓN

La odontogénesis (OG) es el proceso de formación de los dientes que involucra una serie de complejos mecanismos biológicos, tisulares y moleculares (Jheon *et al.* 2013; Takara *et al.* 2017). El desarrollo dental requiere de la participación del epitelio dental de origen ectodérmico y del ectomesénquima cefálico, derivado de las células de la cresta neural, donde acontecen interacciones entre los tejidos adyacentes, proceso denominado de inducción (Zhang *et al.* 2021). El proceso comienza con la formación de la lámina dental, engrosamiento del epitelio que reviste el estomodeo y que prolifera por mitosis dentro del ectomesénquima subyacente. La lámina dental continúa proliferando y se diferencia originando las estructural embrionarias de los gérmenes dentales. Así, atraviesa diferentes estadios, denominados de yema, casquete, campana inicial y campana aposicional. En el primer estadio, la condensación del epitelio en el extremo distal de la lámina dental y la condensación del mesénquima alrededor de éste, origina un engrosamiento redondeado o yema; sin embargo, el epitelio y el ectomesénquima se suelen separar por una membrana basal (Obara *et al.* 2017). La masa celular de origen ectodérmico formará, en futuro, el órgano del esmalte, mientras que el ectomesénquima, que rodea a la yema epitelial, dará origen a la papila dental.

En el segundo estadio, denominado casquete, ocurre una concavidad en el centro de la yema, tomando una forma semejante a un casquete. Esta invaginación ocurre como consecuencia de la activa proliferación de las células de los bordes laterales de la yema. Esta zona epitelial de la yema se denomina ahora órgano del esmalte, donde se diferencian un epitelio externo, uno interno y el retículo estrellado; además, estructuras transitorias, como el nudo del esmalte y la cuerda del esmalte (Peterkova *et al.* 2014). En la concavidad del casquete se localiza el ectomesénquima, que va a dar origen a la papila dental. En esta etapa, se expresan vías de señalización, como sonic hedgehog (SHH), proteínas morfogénicas óseas (BMPs) y factores de crecimiento fibroblástico (FGFs) (Hosoya *et al.* 2020; Zhu *et al.* 2024). La desconexión de los órganos del esmalte con el epitelio bucal se produce en el estadio de campana, donde el futuro diente empieza a actuar como un tejido independiente (Hosoya *et al.* 2020). En el estadio de campana inicial aparece el estrato intermedio y, a partir del epitelio interno, se originan los preameloblastos y, luego, se transforman en ameloblastos jóvenes; estos últimos, interactúan con el ectomesénquima de la papila dental, iniciándose la diferenciación de los dentinoblastos que, luego, secretarán la matriz de la dentina. Al final de esta etapa, se diferencian los ameloblastos secretores que no secretarán matriz hasta que se forme la primera capa de dentina (Balzano *et al.* 2021).

En la etapa de campana aposicional, la dentina es el primer tejido mineralizado del diente que se forma, lo que induce a los ameloblastos, a la formación de la matriz y a su posterior mineralización. La fusión de los epitelios externo e interno forman el asa cervical, estructura encargada de formar la vaina epitelial radicular que, a posteriori, prolifera en profundidad y se diferencia formando la vaina epitelial de la raíz del diente, estructura fundamental para la formación de la raíz (Radlanski *et al.* 2015).

Por otro lado, las CKs son filamentos intermedios exclusivos de los tejidos epiteliales, de naturaleza variable, según la diferenciación de los epitelioцитos. Las CK se clasifican en CK ácidas de bajo peso molecular, de tipo I y las citoqueratinas de alto peso, básicas o neutras de tipo II.

Estas CKs actúan en los procesos de diferenciación celular y cumplen la función de sostén, estabilidad e integridad de los epitelioцитos (Jacob *et al.* 2018). La distribución de las CKs en los distintos epitelios es variable. CK1 y 10 se suelen encontrar en la capa supra-basal del epitelio estratificado escamoso cornificado, así como CK4 y CK13, se localizan en la capa supra-basal del epitelio estratificado escamoso no cornificado; CK5, se co-expresa con CK14 en capas basales y supra-basales de los epitelios escamosos, mientras que CK20 es un marcador específico de los epitelioцитos táctiles, frecuentemente presentes en la mucosa oral cornificada (Li *et al.* 2015); sin embargo, son escasas las investigaciones que abordan la identificación de las CKs durante la odontogénesis en ratones (Yang *et al.* 2019).

Dada la limitada información sobre el rol que desempeñan las CKs durante el desarrollo dental, sería de gran interés detallar la distribución de estas proteínas durante el proceso de formación del diente. El objetivo del presente trabajo fue identificar y describir la expresión inmunohistoquímica de CK 19 y 14 durante el desarrollo dental de incisivos de ratón.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizaron 12 incisivos de ratones macho Swiss WT (Janvier, St Berthevin), de siete días de crecimiento continuo. Las mandíbulas se obtuvieron previa anestesia y perfusión con paraformaldehído (PFA, Sigma-Aldrich Co.), al 4 %. Se realizó la microdissección de los tejidos utilizando un estereomicroscopio (Leica MZ FLIII, Leica Microscopy Systems). Inicialmente, se aisló la mandíbula del hueso basal; luego, se eliminaron los tejidos blandos, previa extracción de los incisivos en erupción continua, mediante una cureta Gracey (Hu-Friedy). Los dientes recuperados se lavaron cuidadosamente con solución salina bufferada Dulbecco (DPBS, Invitrogen).

Luego de la microdissección, los incisivos se fijaron por inmersión en paraformaldehído a 4 % (PFA, Sigma-Aldrich Co.) y glutaraldehído al 0,1 % (Sigma-Aldrich Co.), durante 24 horas. Posteriormente, se descalcificaron en EDTA al 10 %, durante 4 semanas; luego, se realizó la técnica de inclusión en parafina. Obtenido los bloques, se realizaron cortes de 6 µm, con un micrótopo Leica RM2125 RST. Finalmente, se identificaron las láminas que contenían cortes, cuyo aspecto morfológico podía ser verificado, mediante la coloración de Hematoxilina y eosina.

Inmunohistoquímica. Luego de seleccionar los cortes de los incisivos, se desparafinizaron y rehidrataron. Los cortes se colocaron en peroxidasa endógena durante 10 minutos y se lavaron con PBS1X. Los tejidos se incubaron durante 1 hora en la solución bloqueadora del kit Universal Quick Kit, Vectastain, Vector Laboratories, England. Inmediatamente, los cortes se incubaron

con los anticuerpos primarios a 4 °C, durante toda la noche. Posteriormente, las láminas permanecieron en contacto con el anticuerpo secundario biotinilado a temperatura ambiente, durante 30 minutos. Previo lavado con PBS1X, los cortes se incubaron con diaminobencidina (Sistema Impact DAB, Nova Red; Vector Laboratories, England), por un tiempo máximo de 10 minutos, seguido de un lavado en agua destilada. Finalmente, se procedió al montaje de los cortes.

Para la técnica inmunohistoquímica se emplearon anticuerpos primarios monoclonales de conejo anti-CK14 [EP1612Y – aa 400-extremo c-terminal] (1:500, ab51054-abcam) y anti-CK 19 [EP1580Y] (1:500, ab52625-abcam). Como control positivo se empleó el anticuerpo primario policlonal anti-amelogenina (1:600, ab153915-abcam - AMG aa 1-191). El control negativo fue realizado sin la presencia del anticuerpo primario, reemplazado por la solución bloqueadora. Todas las observaciones se realizaron con un microscopio Leica DM6, al que se acopló una cámara fotográfica.

Aspectos éticos: Se respetó la resolución 008430 de 1993 de la República de Colombia. Los experimentos se realizaron según los principios internacionales de las 3R y las pautas para el cuidado y

uso de animales de laboratorio, en concordancia con la Guide for the care and use of laboratory animals (Degrazia *et al.* 2019). Este trabajo contó con el aval del comité de ética en investigación de la Universidad de Cartagena, Colombia.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La evaluación inmunohistológica realizada puso en evidencia el proceso de desarrollo fisiológico presente en la formación dental. Esta observación permitió distinguir aquellas células de origen epitelial y de origen ectomesenquimático.

Se evidenciaron papilas dentales con múltiples células con núcleos ovalados de origen ectomesenquimático en toda su extensión. En el centro del órgano del esmalte se observaron algunas células con forma de estrella, formando el retículo estrellado, limitado, por fuera, por el epitelio dental externo y, por dentro, por el epitelio dental interno del esmalte (Figura 1). Alrededor del germen del esmalte se puede presenciar un ectomesénquima condensado, que constituía el saco dental. La localización inmunohistoquímica de CK19 era evidente en las zonas periféricas de ambos epitelios del órgano del esmalte (interno y externo), con una expresión inmunohistoquímica moderada (Figura 2a).

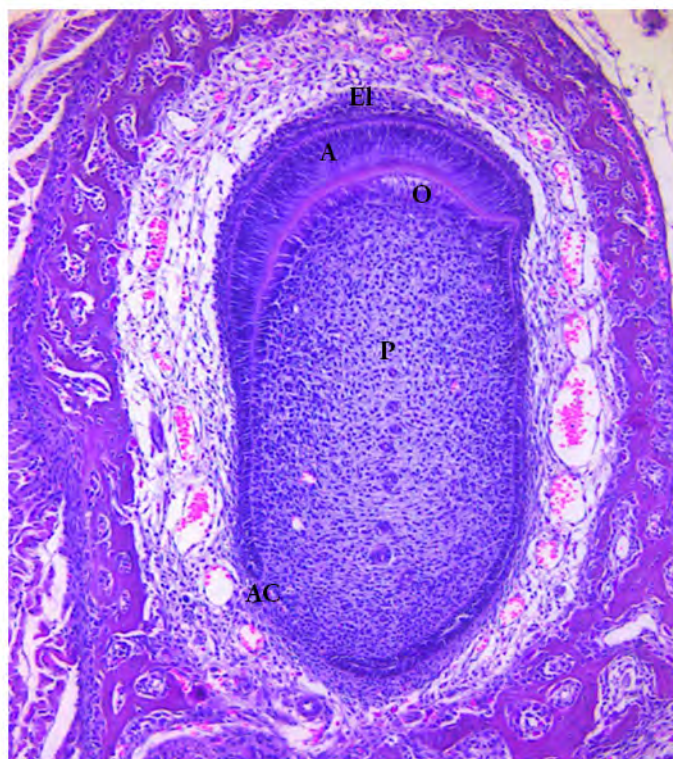


Figura 1. Aspecto anatómico de Incisivo de crecimiento continuo de ratón Swiss WT, de siete días posnatal. EI: estrato intermedio; A: ameloblastos; O: dentinoblastos; P: pulpa dental; AC: asa cervical. Coloración hematoxilina-eosina.



Figura 2. a) Expresión inmunohistoquímica de CK19 durante el inicio de la histodiferenciación celular. b) Expresión inmunohistoquímica de CK19 en etapas finales de la histodiferenciación celular, coincidente con la formación del esmalte dental. En marrón: inmunodetección de la CK19. EI: estrato intermedio; A: ameloblastos; O: dentinoblastos; P: pulpa dental; AC: asa cervical. Barra negra: 40 µm (A,B).

En un estadio más avanzado, se observó la diferenciación de las células del órgano del esmalte en ameloblastos, debajo de la capa suprabasal y el comienzo de la aposición del esmalte. La condensación de los componentes ectomesenquimáticos que rodeaban al diente era bien manifiesta y la papila dental mostró un aumento de la proliferación celular. La expresión de CK19 era muy marcada en la zona de los tejidos epiteliales, principalmente, en la zona externa que rodea la formación del diente, incluyendo, las células de la zona que serán las futuras raíces dentales (asa cervical) (Figura 3b).

Las células de la papila dental próximas al órgano del esmalte mostraron una notoria expresión de CK19, mientras que su expresión en las células del órgano del esmalte era inferior, al compararla con las células de la papila dental. Se identificaron inmunomarcajes con CK19 en la matriz de esmalte recién sintetizada (Figura 3a). En las células distribuidas cerca de la zona del asa cervical, se observó la mayor expresión de CK19, estructura fundamental para el desarrollo radicular (Figura 3b).

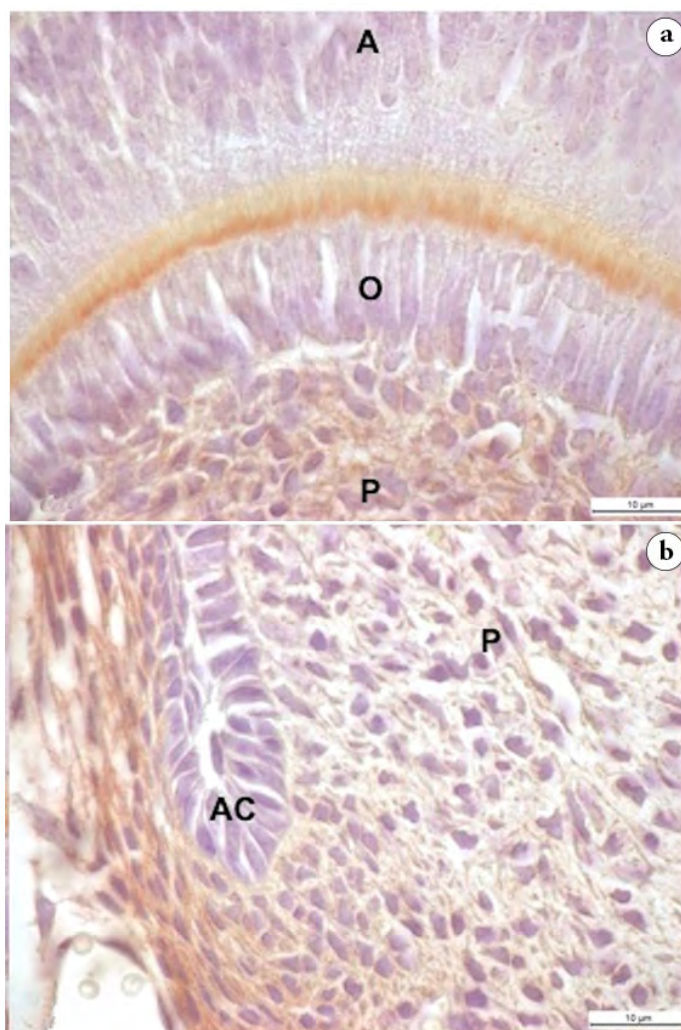


Figura 3. a) Inmunolocalización de la CK19 durante la etapa inicial de secreción de la matriz del esmalte dental. b) Localización inmunohistoquímica de la CK19 en la zona del asa cervical del incisivo dental. En marrón: inmunodetección de la CK19. A: ameloblastos; O: dentinoblastos; P: pulpa dental; AC: asa cervical. Barra negra: 10 µm (A,B).

En el análisis inmunohistológico de la CK14 en los incisivos de crecimiento continuo, se identificaron células morfológicamente normales, que conservaron su polaridad celular. Estas células presentaban núcleos ovalados, incluyendo, aquellas células situadas dentro de la papila dental. La localización inmunohistoquímica de la CK14 estuvo presente en células, que surgieron de la unión del epitelio dental externo y del epitelio dental interno, con un marcaje más acentuado en las células del estrato intermedio y en las células situadas en la periferia de la pulpa dental (Figura 4). En una observación más detallada, se pudo constatar que los ameloblastos, dentinoblastos y una población importante de células, próximas del asa cervical, eran positivas para CK14 (Figura 4). En la tabla 1 se resumen las principales localizaciones inmunohistoquímica de las proteínas CK19 y CK14, durante la odontogénesis.

La inmunomarcación con las CKs empleadas fue evidente en distintas etapas de la odontogénesis. La inmunolocalización de estos filamentos intermedios (CK19, CK14) pone en evidencia su importancia fisiológica en la formación dental. En la presente

investigación, el patrón de expresión de la CK19, estudiado en los incisivos de crecimiento continuo, fue más pronunciada en las células del estrato intermedio, matriz del esmalte recién sintetizado y algunas células presentes en la periferia de la pulpa dental, a diferencia de los ameloblastos y dentinoblastos. La CK19 es proteína ácida de la familia de CKs, habitualmente, expresada en células basales de epitelios escamosos (Akhila *et al.* 2021). Se ha informado que la expresión de la CK19, cuando ocurre en células suprabasales de epitelios no cornificados, se relaciona con los diferentes grados de la displasia epitelial (Safadi *et al.* 2020); sin embargo, en la literatura consultada no se investigó en estudios previos esta expresión durante el proceso fisiológico de la formación dental, en incisivos de ratones.

Aunque la expresión de la CK19 se presenta en diversas condiciones patológicas sistémicas, como fue reportado, también, se describe su presencia en los hepatocitos humanos normales y su importancia durante el desarrollo embrionario del hígado (Lee *et al.* 2020; Koike *et al.* 2022), en las células madre de la epidermis y su rol durante la

reparación de heridas (Sukmawati *et al.* 2020). En este estudio, la detención inmunohistoquímica de la CK19 en las células presentes a la zona adyacente del asa cervical sería indicativo de la elevada presencia de células madre en una zona formadora de la futura raíz dental. Por su parte, la inmunolocalización de la CK19 en la zona rica en células de la pulpa dental, mostraría la localización de

células precursoras totipotenciales de la pulpa dental, posiblemente, responsables de dar origen a células, como dentinoblastos y endotelioцитos. Los hallazgos de la CK19 en estas localizaciones celulares permiten corroborar que una mayor expresión de CK19 se relaciona con un mayor potencial proliferativo y troncalidad celular, tal como ha sido reportado por Li *et al.* (2021).

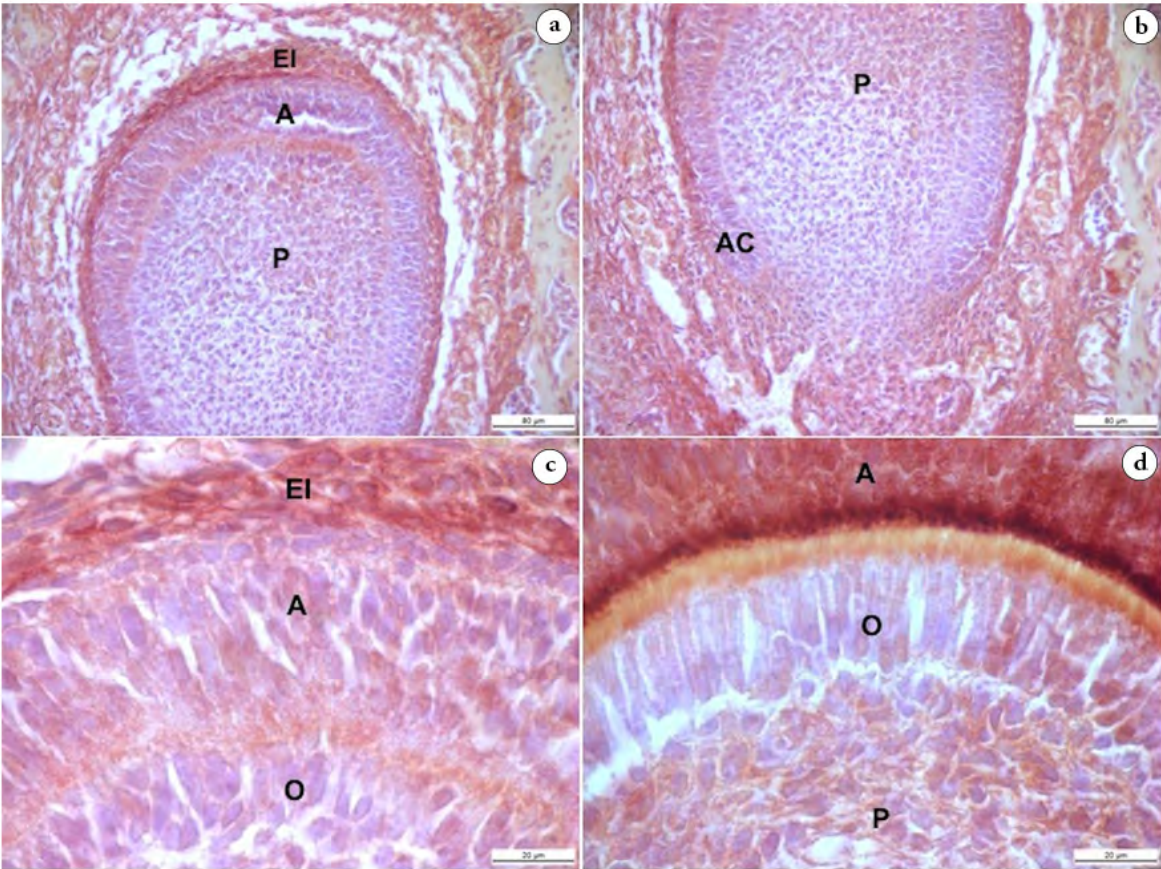


Figura 4. Expresión inmunohistoquímica de CK14 en estrato basal y células pulpares. Inmunolocalización de la CK14 en ameloblastos, y dentinoblastos. En marrón: inmunodetección de la CK14. EI: estrato intermedio; A: ameloblastos; O: dentinoblastos; P: pulpa dental; AC: asa cervical. Barra negra: 80 μm (a, b) y 20 μm (c, d).

Tabla 1. Inmunolocalización de CK19 y CK14 en tejidos dentales.

Marcador inmunohistoquímico	Estrato intermedio	Ameloblastos	Dentinoblastos	Pulpa dental	Asa cervical
CK19	No	No	No	Si	Si
CK14	Si	Si	Si	Si	Si

La identificación inmunohistoquímica permitió constatar la CK18, considerada la citoqueratina ácida de menor peso molecular, en estructuras, como la lámina dental y el epitelio del esmalte. La identificación de la CK18, ubicada en estas regiones anatómicas, se relacionaría con áreas de elevada migración celular (Infante *et al.* 2022). Es bien conocido que la CK18 brinda un andamiaje

intracelular al citoplasma y contribuye a las diferentes tensiones a las que son sujetas las células, particularmente, durante el proceso de morfodiferenciación celular, acontecido en la odontogénesis; no obstante, las funciones de la CK18 también involucran a la progresión del ciclo celular, señalización y procesos celulares, como la mitosis y la apoptosis (Cheng *et al.* 2019).

La localización de la CK18 en el estrato intermedio indicaría que esta zona del germen dental se encuentra regulada, a través de vía de señalización, que facilitan la motilidad celular (Infante *et al.* 2022). Aunque el presente trabajo de investigación no incluyó la identificación de vías de señalización, estudios precedentes han informado que en el mecanismo de regulación del crecimiento con participación activa de la CK18 involucran a la fosfoinositida 3-quinasa (PI3K)/Akt. Todo indicaría que la interacción entre vía PI3K/Akt con el citoesqueleto regularía el normal desarrollo de procesos proliferativos, tal como ocurre durante la odontogénesis (Deng *et al.* 2022). Con el propósito de mejorar la comprensión de la CK18 en la formación de tejidos dentales es menester lograr la identificación de nuevas proteínas relacionadas con la CK18 y analizar en modelos animales, por ejemplo, ratones transgénicos, las posibles modificaciones presentes durante la formación de los dientes dental.

De los resultados obtenidos se puede concluir que las CK19 y CK14 fueron inmunohistoquímicamente identificadas en los incisivos, dientes de crecimiento continuo, de ratones macho Swiss. La CK19 se localiza en la lámina dental, las células que rodean el asa cervical y células de la pulpa dental, mientras que la CK14 se localiza en la lámina dental, ameloblastos y dentinoblastos.

Conflictos de intereses: El artículo fue redactado y revisado por todos los autores, quienes declaran que no existen conflicto de intereses que pongan en riesgo la validez de los resultados presentados. **Contribución autores:** Kevin Díaz-Rojas y Víctor Simancas-Escorcía realizaron la curaduría y el análisis formal de los datos para la escritura del borrador del manuscrito; asimismo, contribuyeron con la investigación en campo y manejo de recursos. Particularmente, Víctor Simancas-Escorcía lideró la contextualización y la metodología del manuscrito. Todos los autores participaron en la redacción, la revisión, la edición del manuscrito y la versión final. **Financiación:** Este estudio fue autofinanciado.

REFERENCIAS

- AKHILA, C.N.V.; SREENATH, G.; PRAKASH, A.R.; KANTH, M.; REDDY, A.V.S.; KUMAR, S.N. 2021. Expression of stem cell marker cytokeratin 19 in reduced enamel epithelium, dentigerous cyst and unicystic ameloblastoma - A comparative analysis. *Journal of Oral and Maxillofacial Pathology*. 25(1):136-140. https://doi.org/10.4103/jomfp.JOMFP_316_19
- BALZANO, R.; STELLINI, E.; MUCIGNAT-CARETTA, C. 2021. Cell differentiation and replication during postnatal development of the murine first molar. *Biology*. 10(8):776. <https://doi.org/10.3390/biology10080776>
- CHENG, Y.; QIN, K.; HUANG, N.; ZHOU, Z.; XIONG, H.; ZHAO, J.; ZHANG, Y.; YU, S. 2019. Cytokeratin 18 regulates the transcription and alternative splicing of apoptotic related genes and pathways in HeLa cells. *Oncology Reports*. 42(1):301-312. <https://doi.org/10.3892/or.2019.7166>
- DEGRAZIA, D.; BEAUCHAMP, T.L. 2019. Beyond the 3 Rs to a more comprehensive framework of principles for animal research ethics. *ILAR journal*. 60(3):308-317. <https://doi.org/10.1093/ilar/ilz011>
- DENG, S.; LEONG, H.C.; DATTA, A.; GOPAL, V.; KUMAR, A.P.; YAP, C.T. 2022. PI3K/AKT Signaling Tips the balance of cytoskeletal forces for cancer progression. *Cancers*. 14(7):1652. <https://doi.org/10.3390/cancers14071652>
- HOSOYA, A.; SHALEHIN, N.; TAKEBE, H.; SHIMO, T.; IRIE, K. 2020. Sonic Hedgehog signaling and tooth development. *International Journal of Molecular Sciences*. 21(5):1587. <https://doi.org/10.3390/ijms21051587>
- INFANTE, E.; ETIENNE-MANNEVILLE, S. 2022. Intermediate filaments: Integration of cell mechanical properties during migration. *Frontiers in Cell and Developmental Biology*. 10:951816. <https://doi.org/10.3389/fcell.2022.951816>
- JACOB, J.T.; COULOMBE, P.A.; KWAN, R.; OMARY, M.B. 2018. Types I and II keratin intermediate filaments. *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology*. 10(4):a018275. <https://doi.org/10.1101/cshperspect.a018275>
- JHEON, A.H.; SEIDEL, K.; BIEHS, B.; KLEIN, O.D. 2013. From molecules to mastication: the development and evolution of teeth. *Wires Mechanism of Disease*. 2(2):165-182. <https://doi.org/10.1002/wdev.63>
- KOIKE, N.; TADOKORO, T.; UENO, Y.; OKAMOTO, S.; KOBAYASHI, T.; MURATA, S.; TANIGUCHI, H. 2022. Development of the nervous system in mouse liver. *World Journal of Hepatology*. 14(2):386-399. <https://doi.org/10.4254/wjh.v14.i2.386>
- LEE, S.M.L.; BERTINETTI-LAPATKI, C.; SCHIERGENS, T.S.; JAUCH, K.W.; ROTH, A.B.; THASLER, W.E. 2020. Concurrent isolation of hepatic stem cells and hepatocytes from the human liver. *In Vitro Cellular & Developmental Biology - Animal*. 56(3):253-260. <https://doi.org/10.1007/s11626-020-00433-w>
- LI, B.; TANG, H.; BIAN, X.; MA, K.; CHANG, J.; FU, X.; ZHANG, C. 2021. Calcium silicate accelerates cutaneous wound healing with enhanced re-epithelialization through EGF/EGFR/ERK-mediated promotion of epidermal stem cell functions. *Burns & Trauma*. 9:tkab029. <https://doi.org/10.1093/burnst/tkab029>
- LI, S.; GE, S.; YANG, P. 2015. Expression of cytokeratins in enamel organ, junctional epithelium and epithelial cell rests of Malassez. *Journal of Periodontal Research*. 50(6):846-854. <https://doi.org/10.1111/jre.12272>

- MINISTERIO DE SALUD, COLOMBIA. 1993. Resolución número 8430 de 1993, por la cual se establecen las normas científicas, técnicas y administrativas para la investigación en salud. Disponible desde Internet en: <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/DE/DIJ/RESOLUCION-8430-DE-1993.PDF>
- OBARA, N.; SUZUKI, Y.; IRIE, K.; SHIBATA, S. 2017. Expression of planar cell polarity genes during mouse tooth development. *Archives of Oral Biology*. 83:85-91. <https://doi.org/10.1016/j.archoralbio.2017.07.008>
- PETERKOVA, R.; HOVORAKOVA, M.; PETERKA, M.; LESOT, H. 2014. Three-dimensional analysis of the early development of the dentition. *Australian Dental Journal*. 59(1):55-80. <https://doi.org/10.1111/adj.12130>
- RADLANSKI, R.J.; RENZ, H.; ZIMMERMANN, C.A.; MEY, R.; MATALOVA, E. 2015. Morphogenesis of the compartmentalizing bone around the molar primordia in the mouse mandible during dental developmental stages between lamina, bell-stage, and root formation (E13-P20). *Annals of Anatomy*. 200:1-14. <https://doi.org/10.1016/j.aanat.2015.01.003>
- SAFADI, R.A.; ALROMAIZAN, A.; ALSHAGROUD, R.S.; DIVAKAR, D.D.; ALSHIEBAN, S. 2020. Cytokeratin 19 immunostain reduces variability in grading epithelial dysplasia of the non-keratinized upper aerodigestive tract mucosa. *Head and Neck Pathology*. 14(1):183-191. <https://doi.org/10.1007/s12105-019-01038-w>
- SUKMAWATI, D.; ERYANI, A.; DAMAYANTI, L. 2020. Silver sulfadiazine's effect on keratin-19 expression as stem cell marker in burn wound healing. *Biomedicine*. 10(2):5-11. <https://doi.org/10.37796/2211-8039.1014>
- TAKARA, K.; MARUO, N.; OKA, K.; KAJI, C.; HATAKEYAMA, Y.; SAWA, N.; KATO, Y.; YAMASHITA, J.; KOJIMA, H.; SAWA, Y. 2017. Morphological study of tooth development in podoplanin-deficient mice. *PLoS One*. 12(2):e0171912. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0171912>
- YANG, X.; YAMAZAKI, H.; YAMAKOSHI, Y.; DUVERGER, O.; MORASSO, M.; BENIASH E. 2019. Trafficking and secretion of keratin 75 by ameloblasts *in vivo*. *Journal of Biological Chemistry*. 294(48):18475-18487. <https://doi.org/10.1074/jbc.RA119.010037>
- ZHANG, W.; YELICK, P.C. 2021. Tooth repair and regeneration: potential of dental stem cells. *Trends in Molecular Medicine*. 27(5):501-511. <https://doi.org/10.1016/j.molmed.2021.02.005>
- ZHU, X.; LI, Y.; DONG, Q.; TIAN, C.; GONG, J.; BAI, X.; RUAN, J.; GAO, J. 2024. Small molecules promote the rapid generation of dental epithelial cells from human-induced pluripotent stem cells. *International Journal of Molecular Sciences* 25:4138. <https://doi.org/10.3390/ijms25084138>

Pares evaluadores

El Comité Editorial y el Comité Científico desean expresar sus agradecimientos a todas las personas que colaboraron en la evaluación de manuscritos, entre los meses de julio a diciembre de 2024. Nuestra gratitud a su invaluable colaboración.

En reconocimiento publicamos a continuación sus nombres:

Ph.D. Carlos Ernesto Aguilar Jiménez, Universidad Autónoma de Chiapas, **México**
Ph.D. Héctor Alonso Aponte Ubillús, Universidad Científica del Sur, **Perú**
Ph.D. Rita María Ávila G. de Hernández, Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado, **Venezuela**
Ph.D. Rodolfo Avila Uliarte, Universidad Nacional de Córdoba, **Argentina**
Ph.D. Zaidett Barrientos Llosa, Universidad Estatal a Distancia, **Costa Rica**
Ph.D. Jesús Hernán Camacho Tamayo, Universidad Nacional de Colombia, **Colombia**
Ph.D. Alexis Castillo Bruna, Universidad Católica del Maule, **Chile**
Ph.D. Luis Alfonso Causil Vargas, Universidad de Magdalena, **Colombia**
M.Sc. Diana Carolina Cedeño Alcívar, Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí “Manuel Félix López”, **Ecuador**
M.Sc. Cristhian David Chicaiza Ortiz, Universidad Regional Amazónica, **Ecuador**
Ph.D. Samuel Córdova Sánchez, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, **México**
Ph.D. Mayra Díaz Vargas, Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales, **Colombia**
M.Sc. Carlos Felipe Duque Ramírez, Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales, **Colombia**
Ph.D. Luis Hernando Estupiñán, Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales, **Colombia**
Ph.D. Paulina Andrea Freire Vásquez, California State University, **Estados Unidos**
Ph.D. Rigoberto Miguel García Batista, Universidad Técnica de Machala, **Ecuador**
M.Sc. Carmen Liceth García Quintero, Universidad Nacional de Colombia, **Colombia**
Ph.D. Julio González Candia Universidad de Santiago de Chile, **Chile**
M.Sc. Rafael Alberto Guajardo Panes, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, **México**
Ph.D. Andrea Limoeiro Carvalho, Universidade Federal da Bahia, **Brasil**
Ph.D. Orestes Darío López Hernández, Universidad Técnica de Ambato, **Ecuador**
M.Sc. Mariana de Jesús Marcial, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias, **México**
Ph.D. Oscar Iván Monsalve, Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales, **Colombia**
Ph.D. Claudia Irene Ortiz Arrona, Universidad de Guadalajara, **México**
Ph.D. Beatriz Elena Padilla Hurtado, Instituto de Investigación en Microbiología y Biotecnología Agroindustrial - Universidad Católica de Manizales, **Colombia**
Ph.D. Gregory Anthony Pauca Tanco, Instituto de Investigación de Ciencia y Gestión Ambiental, **Perú**
M.Sc. Rosa Amelia Perales Camacho, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, **Perú**
M.Sc. Adriana Posada Arrubla, Investigador Independiente, **Colombia**
Ph.D. Camilo Alberto Prieto Mojica, Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales, **Colombia**
M.Sc. Gloria Inés Puerta, Café Ensoñación Gourmet, **Colombia**
Ph.D. Víctor Manuel Pulido Capurro, Universidad Privada San Juan Bautista, **Perú**
Ph.D. Amalia Andrea Ramos Portilla, Instituto Colombiano Agropecuario, **Colombia**
Ph.D. Oscar Javier Robayo Pinzón, Colegio Mayor Nuestra Señora del Rosario, **Colombia**
Ph.D. José Ariel Rodríguez Pulido, Universidad de los Llanos, **Colombia**
Ph.D. Jesica Rubiano Moreno, Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales, **Colombia**
Ph.D. Sergio Salgado Velázquez, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, **México**
Ph.D. María Elena Samar Romani, Universidad Nacional de Córdoba, **Argentina**
Ph.D. Primo Sánchez Morales, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, **México**
Ph.D. Juan Manuel Tirado Gallegos, Universidad Autónoma de Chihuahua, **México**
Ph.D. Franco Alirio Vallejo Cabrera, Universidad Nacional de Colombia, **Colombia**
M.Sc. Jonathan Vásquez Lizcano, Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales, **Colombia**
Ph.D. Javier Enrique Vélez, Universidad Nacional de Colombia, **Colombia**
Ph.D. Jorge Fernando Vélez Ruiz, Universidad de las Américas Puebla, **México**
Ph.D. Isidro Zapata Hernández, Universidad Autónoma de Chiapas, **México**

La U.D.C.A

El punto de partida para tu proyecto de vida

¡Conoce nuestra oferta Académica!



**Programas
de Posgrados**



**Programas
de Pregrados**

