





REVISTA DE INVESTIGACIÓN AGRARIA Y AMBIENTAL

VOLUMEN 15 NÚMERO 2 – (JULIO - DICIEMBRE DE 2024)

E-ISSN 2145-6453

ISSN 2145-6097





Revista de Investigación Agraria y Ambiental

Volumen 15, Número 2 – (Julio - Diciembre de 2024) – e-ISSN 2145-6453 - ISSN 2145-6097

CUERPO DIRECTIVO

JAIME ALBERTO LEAL AFANADOR
Rector UNAD

CONSTANZA ABADÍA GARCÍA
Vicerrector Académica y de
Investigación

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

LEONARDO YUNDA PERLAZA
Vicerrector de Medios y Mediaciones
Pedagógicas

JULIA ALBA ANGEL OSORIO
Vicerrector de Desarrollo Regional y
Proyección Comunitaria

**LEONARDO E VEMELETH SANCHEZ
TORRES**
Vicerrector de Relaciones
Internacionales

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

**JUAN SEBASTIÁN CHIRIVÍ
SALOMÓN**
Líder Nacional de Investigación

CAROLINA GUTIERREZ
Líder Nacional de Investigación Es-
cuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias
y del Medio Ambiente

EQUIPO EDITORIAL

GERARDO OJEDA
Director Editor

**MARGARITA ROSA
BONILLA OSPINA**
Co-editora

COMITÉ EDITORIAL

JORDI SARDANS
Investigador – Unidad
de Ecología Global CREAFC-SIC Uni-
versitat Autònoma
de Barcelona, España.

EDMUND PERFECT

Department of Earth and Planetary
Sciences.
University of Tennessee, Knoxville,
Estados Unidos.

JÖRG BACHMANN

Institut für Bodenkunde. Leibniz
Universität Hannover, Alemania.

ABÍLIO SOBRAL

Centro de Química.
Universidade de Coimbra, Portugal.

ELISABETE FIGUEIREDO

Departamento de Ciências Sociais,
Políticas e do Território. Universi-
dade de Aveiro, Portugal.

XAVIER DOMENE

Centre de Recerca Ecològica i Aplica-
cions Forestals - CREAF. Universitat
Autònoma de Barcelona, Espanya.

FILIPA BESSA

Centro de Ciências do Mar e do Am-
biente - MARE.
Universidade de Coimbra, Portugal.

MARCELO GANDINI

Facultad de Agronomía.
Universidad Nacional del Centro de
la Provincia de Buenos Aires, Argen-
tina.

HENRY ZÚÑIGA BENÍTEZ

Departamento de Ingeniería Quími-
ca. Universidad de Antioquia, Co-
lombia.

CARLOS ABANTO RODRÍGUEZ

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

SUSANA RODRÍGUEZ BURITICÁ

Ecología Espacial. Instituto de Inves-
tigación de Recursos Biológicos Al-
exander von Humboldt, Colombia.

ROLANDO TITO BACCA IBARRA

Departamento de Sanidad Vegetal.
Universidad del Tolima, Colombia.

FERNANDO FERNÁNDEZ MÉNDEZ

Facultad de Ingeniería Forestal. Uni-
versidad del Tolima, Colombia.

JESÚS VARGAS HERNÁNDEZ

Departamento de Ciencias Forestales.
Colegio de Posgraduados, México.

EDGAR JOSÉ JAIMES CÁRDENAS

Facultad de Agronomía.

Universidad de Los Andes, Venezuela.

MARTÍN ORLANDO PULIDO

MEDELLÍN

Departamento de Medicina Veterinaria
y Zootecnia.
Universidad Pedagógica y Tecnológica
de Colombia, Colombia.

Corrector de estilo

Lina María Salazar

Diseño y diagramación

Ana María Salamanca V.

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

Escuela de Ciencias Agrícolas,
Pecuarias y del Medio Ambiente

Universidad Nacional Abierta
y a Distancia

Calle 14 Sur N. 14-23 Bogotá,
Colombia

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

La revista puede consultarse en
su versión electrónica en:

[http://hemeroteca.unad.edu.co/
index.php/riaa/issue/archive](http://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/issue/archive)

PRESENTACIÓN ■

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

Misión

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

Público al que se dirige

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

Periodicidad

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



■ CESIÓN DE DERECHOS

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

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

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

INDEXACIONES ■

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

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

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

REVISORES ACADÉMICOS ■

Volumen 15, Número 2, año 2024.

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

Alejandro Arango Correa, Corporación Universitaria Remington, Colombia

Álvaro Gómez González, Investigador Independiente, Colombia

Ana Martínez Rodríguez, Queen Mary University of London, Reino Unido

Betty Jazmín Gutiérrez, AGROSAVIA, Colombia

Cesar Santiago Salazar, El Colegio de la Frontera Sur, México

Daniel Andrés López, Universidad de Lethbridge, Canadá

Daniel López Lima, Universidad Veracruzana, México

Daniel Torres, AGROSAVIA, Colombia

Danilo Carvajal, Universidad de la Serena, Chile

Deisy Toloza, AGROSAVIA, Colombia

Doris Mejía, Universidad de Córdoba, Colombia

Eustacio Ramírez Fuentes, Universidad del Mar, México

Gerardo Loera Alvarado, Universidad Autónoma de Chapingo, México

Guillermo Delgado Paredes, Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, Perú

Ibonne Valenzuela, Universidad Francisco de Paula Santander, Colombia

Isidro Zapata, Universidad Autónoma de Chiapas, México

Jairo Camacho, Corporación Universitaria Minuto de Dios, Colombia

Jesus Antonio Pantoja Cueltan, UNIGIS, Colombia

José Gilberto Cardoso, Universidad Nacional Autónoma de México, México

José Iannacone, Universidad Nacional Federico Villarreal, Perú

Josept David Revuelta, Universidad Veracruzana, México

Juan Gabriel Segovia, Universidad de Guanajuato, México

Lloyd Herbert Morris, Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia

Luis Armando Becerra, Universidad Autónoma de Sinaloa, México

Margarita María Sarria, Universidad Nacional de Colombia, Colombia

Mario Alejandro Mejía, Universidad Autónoma de Sinaloa, México

Miguel Zamora Juárez, Universidad Autónoma de Nuevo León, México

Mónica Cristina Rodríguez, Universidad Autónoma Metropolitana, México

Monserrat Vidal, El Colegio de Veracruz-Universidad, México

Paula Marcela Hernández Díaz, Universidad EAFIT, Colombia

Robert Augusto Rodríguez, Universidad Nacional de Colombia, Colombia

Vanessa Solano, Charles Darwin University, Australia

Verónica Quintero, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México

Víctor Barradas, Universidad Nacional Autónoma de México, México

Yesid Avellaneda Avellaneda, AGROSAVIA, Colombia



ÍNDICE

Editorial

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

10

Área Agrícola

1. EVALUACIÓN DE PARÁMETROS RELACIONADOS CON EL CRECIMIENTO DE PLANTAS DE CAFÉ (*Coffea arabica L.*) EN RESPUESTA AL DÉFICIT HÍDRICO DEL SUELO

EVALUATION OF PARAMETERS RELATED TO THE GROWTH OF COFFEE PLANTS (*Coffea arabica L.*) IN RESPONSE TO SOIL MOISTURE DEFICIT

Luz Adriana Lince Salazar, Siavosh Sadeghian Khalajabadi, Ninibeth Gibelli Sarmiento Herrera

11

2. CONTROL BIOLÓGICO CONTRA *Fusarium sp.* EN PLANTAS DE UCHUVA (*Physalis peruviana L.*) A NIVEL DE INVERNADERO MEDIANTE APLICACIÓN COMBINADA DE *Trichoderma SP.* Y *Bacillus SP.*

BIOLOGICAL CONTROL OF *Fusarium* SP. IN CAPE GOOSEBERRY PLANTS (*Physalis peruviana L.*) AT GREENHOUSE LEVEL BY COMBINED APPLICATION OF *Trichoderma* SP. AND *Bacillus* SP.

Marcela Mora López, Ana María Ochoa Aristizábal, Víctor Manuel Osorio Echeverri

35

3. ANÁLISIS DE CRECIMIENTO DEL PASTO KIKUYO (*Cenchrus clandestinus* (Hochst. Ex Chiov.) Morrone) FERTILIZADO CON DIFERENTES NIVELES DE NITRÓGENO

GROWTH ANALYSIS OF KIKUYO GRASS *Cenchrus clandestinus* (Hochst. ex Chiov.) Morrone FERTILIZED WITH DIFFERENT LEVELS OF NITROGEN

Dania Fonseca López, Carlos Eduardo Rodríguez Molano, Nelson Vivas Quilla, Pedro Almanza Merchán, Helber Balaguera López

69

4. EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE ARROZ (*Oryza sativa L.*) COMPARANDO DOS MÉTODOS DE PREPARACIÓN DEL SUELO

RICE (*Oryza sativa L.*) YIELD EVALUATION COMPARING TWO SOIL PREPARATION METHODS

Jordan Alexis Castillo Coronado, Diana Carolina Polanía Montiel, Juan Gonzalo Ardila Marín

91

5. EXTRACTO ETÉREO EN SEMILLAS DE ZAPALLO (*Cucurbita moschata* Duchesne) EN TRES GENERACIONES DE ENDOCRÍA

ETHEREAL EXTRACT IN BUTTERNUT SQUASH SEEDS (*Cucurbita moschata* Duchesne) IN THREE GENERATIONS OF INBREEDING

Magda Piedad Valdés Restrepo, Ginna Alejandra Ordoñez Narváez, Sanín Ortiz Grisales

113

6. IMPLEMENTACIÓN DE ATRAPANIEBLAS COMO ALTERNATIVA DE ABASTECIMIENTO DE AGUA EN EL MUNICIPIO DE TULUÁ

IMPLEMENTATION OF FOG CATCHERS AS AN ALTERNATIVE FOR WATER SUPPLY IN THE MUNICIPALITY OF TULUÁ

Eyder Fabián Jaramillo Arenas, Giovany Tascón Ortiz, Karol Andrea Leal Vásquez, Valentina Lamus Molina, Luisa Fernanda Cabezas Burbano, Vivian Milen Orejuela

131

7. INOCULANTES BIOLÓGICOS: OPORTUNIDADES Y DESAFÍOS PARA LA SUSTENTABILIDAD AGRÍCOLA Y BIOECONOMÍA COLOMBIANA. UNA REVISIÓN

BIOLOGICAL INOCULANTS: OPPORTUNITIES AND CHALLENGES FOR AGRICULTURAL SUSTAINABILITY AND COLOMBIAN BIOECONOMY. A REVIEW

Sandra Patricia Montenegro Gómez, Luisa Fernanda Calderón Vallejo, Brayan Alexis Parra Orobito

151

Área Ambiental

8. CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA DE LA ZONA DE TRANSICIÓN ACUÁTICO TERRESTRE DE UN HUMEDAL TROPICAL (AYAPEL-COLOMBIA)

PHYSICOCHEMICAL CHARACTERIZATION OF THE AQUATIC-TERRESTRIAL TRANSITION ZONE OF A TROPICAL WETLAND (AYAPEL-COLOMBIA)

Maria Díaz-Mesa, Esnedy Hernández, Diana M. Agudelo, Nora E. Villegas, Gabriel A. Agudelo, Sergio E. Herazo, Lina Berrouet, Laura M. Lozano, Natalia Espinosa, Yarin T. Puerta, Fabio D.J. Vélez, Néstor J. Aguirre, Mario A. Quijano-Abril, José M. Rojas Villa, Daniela Cardona, Daniela Salazar, Álvaro Wills

181

9. LA GESTIÓN DE LOS PROYECTOS CONSTRUCTIVOS MEDIANTE UNA VISIÓN HOLÍSTICA DE LA SOSTENIBILIDAD

CONSTRUCTION PROJECT MANAGEMENT THROUGH A HOLISTIC VIEW OF SUSTAINABILITY

Nelson Javier Cely Calixto, Romel Jesús Gallardo Amaya, Carlos Alfonso Zafra Mejía

211

10. SYSTEM DYNAMICS AND VIABILITY THEORY FOR SUSTAINABILITY ASSESSMENT, APPLICATION FOR BIOETHANOL PRODUCTION IN COLOMBIA

DINÁMICA DE SISTEMAS Y TEORÍA DE LA VIABILIDAD PARA LA EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD, APLICACIÓN PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL EN COLOMBIA

Danny Ibarra Vega, Johan Manuel Redondo

237

11. ESTIMACIÓN DE ANALITOS DEL SUELO EN LA ALTIPLANURA, CON TELEDETECCIÓN SENTINEL-2 Y MODELOS DE REGRESIÓN

ESTIMATION OF SOIL ANALYTES IN THE PLATEAU, WITH SENTINEL-2 REMOTE SENSING AND REGRESSION MODELS

Andrés Felipe Gómez Chávez, Jeimy Katherin Feo Mahecha, Sergio David Parra González

269

12. MAYZE YIELD AND CHANGES IN THE CHEMICAL ATTRIBUTES OF SOIL FERTILIZED WITH MALT SLUDGE

RENDIMIENTO DE MAÍZ Y CAMBIOS EN LOS ATRIBUTOS QUÍMICOS DEL SUELO FERTILIZADO CON LODO DE MALTA

Paulo Fortes Neto, Nara Lúcia Perondi Fortes, Lucilene Carvalho Silva

291

13. DINÁMICA ESPACIOTEMPORAL DE LA CONTAMINACIÓN POR MICROPLÁSTICOS EN SEDIMENTOS MARINOS DE LA BAHÍA DE TUMACO, PACÍFICO COLOMBIANO

SPATIAL-TEMPORAL DYNAMICS OF MICROPLASTIC CONTAMINATION IN MARINE SEDIMENTS OF TUMACO BAY, PACIFIC COLOMBIAN PACIFIC

Sofía Martínez Martínez, Andrés Molina Sandoval, Guillermo Duque Nivia

311

CÓMO CITAR - HOW TO CITE

333

INSTRUCCIONES PARA LOS AUTORES – GUIDE FOR AUTHORS

335



■ EDITORIAL

Estimados lectores

Reciban un cordial saludo. Queremos agradecer su preferencia por la Revista de Investigación Agraria y Ambiental para la difusión de su investigación, desde las varias áreas de conocimiento que acogemos en este número.

De acuerdo con nuestros principios de acceso libre a la información científica, continuamos con nuestra política de acceso abierto y gratuito de todos nuestros artículos, gracias al respaldo institucional de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD. Agradecemos profundamente a todos nuestros lectores por el apoyo recibido durante los últimos 15 años. A hombros de gigantes, hemos crecido gracias a ustedes, nuestros queridos investigadores y lectores.

En el presente volumen, los lectores podrán disfrutar de artículos pertenecientes a dos líneas principales de investigación de la Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente - ECAPMA. En el caso del área agrícola, presentamos artículos relacionados con actividad microbiana, parámetros agrícolas de diferentes cultivos, déficit hídrico y sus posibles soluciones. En el área ambiental, presentamos artículos sobre evaluaciones ambientales en términos de contaminación de agua y suelos, enmiendas con lodos industriales, uso de imágenes de satélite para caracterización de suelos y estudios sobre sostenibilidad.

Esperamos que los artículos presentados aquí, representen un aporte significativo al conocimiento de las diferentes áreas del saber incluidas en la revista.

¡Saludos cordiales!

Gerardo Ojeda

Editor en jefe – Editor-in-chief

Margarita Bonilla

Co-editora – Co-editor



Fecha de recibido: 09-05-2023

Fecha de aceptado: 01-09-2023

DOI: 10.22490/21456453.6805

EVALUACIÓN DE PARÁMETROS RELACIONADOS CON EL CRECIMIENTO DE PLANTAS DE CAFÉ (*Coffea arabica L.*) EN RESPUESTA AL DÉFICIT HÍDRICO DEL SUELO

EVALUATION OF PARAMETERS RELATED TO THE GROWTH OF COFFEE PLANTS (*Coffea arabica L.*) IN RESPONSE TO SOIL MOISTURE DEFICIT

Luz Adriana Lince Salazar ¹

Siavosh Sadeghian Khalajabadi ²

Ninibeth Gibelli Sarmiento Herrera ³

¹ MSc, Cenicafé, Manizales, Colombia. luz.lince@cafedecolombia.com

² PhD, Cenicafé, Manizales, Colombia. siavosh.sadeghian@cafedecolombia.com

³ MSc, Cenicafé, Manizales, Colombia. ninibeth.sarmiento@cafedecolombia.com

Citación: Lince, L.A, Sadeghian, S. y Sarmiento, N. (2024). Evaluación de parámetros relacionados con el crecimiento de plantas de café (*Coffea arabica L.*) en respuesta al déficit hídrico del suelo. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 15(2), 11-34.

<https://doi.org/10.22490/21456453.6805>

■ RESUMEN

Contextualización: el agua es indispensable para el desarrollo de las plantas y su respuesta al déficit hídrico varía según las especies y las etapas de crecimiento de estas.

Vacío de conocimiento: se desconoce la magnitud del efecto del déficit hídrico del suelo en el crecimiento de las plantas jóvenes de café (*Coffea arabica* L.) evaluado en el tiempo.

Propósito: se realizó una investigación tendiente a identificar el efecto del déficit hídrico del suelo y por consiguiente la sensibilidad a la sequía en plantas jóvenes de café.

Metodología: se utilizó el método de riego deficitario. Se plantaron colinos de café variedad Cenicafé 1 de 3 meses de edad en materos cilíndricos y se acondicionaron por cuatro meses en casas de malla en Cenicafé, Planalto y posterior al acondicionamiento, por 140 días se evaluó el efecto en el crecimiento y la materia seca de las plantas sometidas a cinco rangos de potencial mátrico del suelo. Los potenciales iban desde -20 ± 10 kPa (testigo) hasta -600 ± 100 kPa

Resultados y conclusiones: los resultados mostraron que el déficit hídrico del suelo afecta el crecimiento de las plantas

jóvenes de café (*C. arabica*), lo que podría definir a *C. arabica* en esta etapa como sensible a la sequía. Las plantas sometidas al menor estrés y a sequía extrema presentaron una disminución del 30% y 57% en materia seca, respectivamente. Para las variables de crecimiento, el efecto del déficit hídrico se evidenció en las evaluaciones de los 77, 113 y 140 días de aplicación de tratamientos. En todos los casos, los resultados mostraron diferencias entre la sequía extrema y el testigo de hasta 30 cm en altura y diámetro ecuatorial, 0.9 m² de área foliar, 132 hojas, 3 cruces y 66 nudos. Los modelos matemáticos que explicaron el efecto de la sequía en la masa seca fueron de tipo logarítmico. Se identificó que para condiciones climáticas y de suelo similares a las del estudio, las plantas jóvenes de café inician el deterioro a los 40 días de sequía. Con un potencial mátrico del suelo cercano a -40 kPa, por un tiempo mantenido de 120 días, las plantas de café pueden perder un 10% de masa seca y cuando el potencial supera los -90 kPa se pueden dar pérdidas mayores en materia seca y disminuciones en el número de cruces entre los 77 y 113 días.

Palabras clave: crecimiento, estrés hídrico, materia seca, potencial mátrico, riego deficitario, sequía

ABSTRACT

Contextualization: Water is indispensable for plant development, and its response to water deficit varies according to the species and their growth stages.

Knowledge gap: The magnitude of the effect of soil water deficit on the growth of young coffee (*Coffea arabica L.*) plants evaluated over time is unknown.

Purpose: Research was carried out to identify the effect of soil water deficit and, therefore, the sensitivity to drought in young coffee plants.

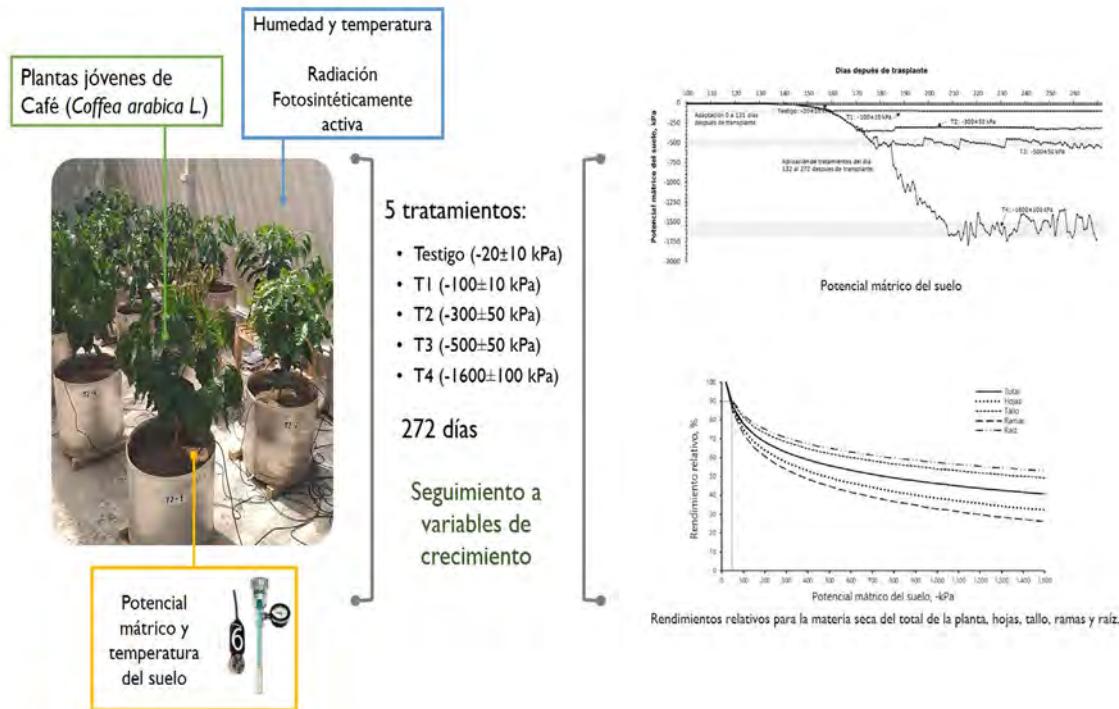
Methodology: The deficit irrigation method was used. Coffee plants of the Cenicafé 1 variety were planted at three months old in cylindrical pots and conditioned for four months in mesh houses at Cenicafé - Planalto. After conditioning, the effect on plants' growth and dry matter subjected to five ranges of soil matric potential was evaluated over 140 days. Potentials ranged from -20 ± 10 kPa (control) to -1600 ± 100 kPa.

Results and conclusions: The results showed that soil water deficit affects the growth of young coffee (*C. arabica*) plants, which could define *C. arabica* at this stage

as drought sensitive. Plants subjected to the least stress and the extreme drought showed a 30% and 57% decrease in dry matter, respectively. For growth variables, the effect of water deficit was evident in the evaluations at 77, 113, and 140 days of treatment application. In all cases, the results showed differences between the extreme drought and the control of up to 30cm in height and equatorial diameter, 0.9 m^2 of leaf area, 132 leaves, 3 branches, and 66 nodes. The mathematical models that explained the effect of drought on dry mass were of the logarithmic type. It was identified that for weather and soil conditions similar to those in the study, young coffee plants begin to deteriorate after 40 days of drought. With a soil matric potential close to -40 kPa, for a time of 120 days, coffee plants can lose 10% of dry mass, and when the potential exceeds -90 kPa there can be further losses in dry matter and decreases in the number of branches between the 77 and 113 days.

Keywords: deficit irrigation, drought, dry matter, growth, matrix potential, water stress

■ RESUMEN GRÁFICO



Fuente: autores.

1 INTRODUCCIÓN

El agua es indispensable para el desarrollo de las plantas por intervenir de forma directa e indirecta en la mayoría de los procesos fisiológicos. La escasez de este recurso genera estrés por sequía en los cultivos y es considerado el tipo de estrés abiótico que causa mayores retrocesos en la productividad agrícola (Ahluwalia *et al.*, 2021; DaMatta, 2004).

Entre los parámetros más destacados para relacionar la producción de los cultivos y el agua en el suelo están: i) el agua disponible en el suelo para los cultivos (HS), que es una referencia universal con la que se cuantifica la cantidad de agua retenida en el suelo entre un potencial mátrico de -33 kPa (capacidad de campo) y -1500 kPa (punto de marchitez permanente).

nente), propuesto por Richards y Weaver (1943). ii) el riego deficitario (RD), el cual es un método útil para identificar la sensibilidad y los efectos del estrés hídrico en plantas, así como para determinar el nivel de agua en que se maximiza la producción, sin ser requisito el rendimiento máximo que se busca con el riego suplementario. iii) la productividad del agua en los cultivos (PA), definida como el rendimiento o el ingreso neto por unidad de agua utilizada (Molden *et al.*, 2003).

Dado que las plantas utilizan diferentes mecanismos para afrontar el estrés hídrico, la respuesta a corto y largo plazo es diferente (Etesami y Maheshwari, 2015). En general, las respuestas a corto plazo ocurren cuando el período de estrés es muy pequeño y habitualmente no causa daño a las plantas (estrés leve a moderado), mientras que las de largo plazo se asocian con períodos prolongados de estrés y producen lesiones celulares que conllevan a daños permanentes en los tejidos (Kaur y Asthir, 2017).

El estrés leve y el moderado, provocado por la sequía a corto plazo, se asocia con respuestas estomáticas como asimilación ineficaz de CO₂ en las hojas y las cavidades subestomáticas (Liu *et al.*, 2019). El severo, consecuencia de la sequía prolongada, se asocia con las no estomáticas, como disminución en la actividad de rubisco, actividad del cloroplasto, deterioro de los fotosistemas I y II (Liu *et al.*, 2019) y producción excesiva de especies reactivas de oxígeno (Chiappero *et al.*, 2019), que llevan a modificar rasgos morfológi-

cos y bioquímicos en las raíces (Liang *et al.*, 2017; Fry *et al.*, 2018). Estas reacciones de defensa, en conjunto, producen daño celular, marchitamiento general y disminución en el crecimiento (Tesfaye, *et al.* 2013; Ngumbi y Kloepper, 2016; Liu, *et al.* 2021). No obstante, la respuesta al estrés y la duración de exposición al evento deficitario es diferente entre plantas, pues depende de la especie y el genotipo (Cavatte *et al.*, 2012; Menezes-Silva *et al.*, 2017).

En Colombia, los procesos de estrés por sequía que se presentan en las plantas de café están asociados con la sequía estacional, donde las deficiencias hídricas anuales más severas se presentan en el municipio de Tibacuy en el departamento de Cundinamarca, Chinácota en Norte de Santander, Restrepo en Valle del Cauca, Dolores en Tolima y Pueblo Bello en Cesar. En las dos primeras se presenta la máxima limitación hídrica, con deficiencias acumuladas durante 10 meses continuos (de diciembre a septiembre) (Jaramillo, 2005).

Otro factor que genera estrés por sequía en varias localidades de la zona cafetera colombiana son los eventos fuertes de El Niño, que históricamente (1982-1983, 1991-1992, 1997-1998 y 2015-2016) han generado disminuciones de hasta un 29% en las lluvias y, de estos períodos, El Niño de 2015-2016 afectó el desarrollo de los árboles de *Coffea arabica* (L.), con atraso en el crecimiento, defoliación, marchitez de las ramas y brotes en alrededor de un 15% de los mismos, así como un deficiente llenando de frutos en el 55% de la producción

(Sadeghian *et al.*, 2017). Estas características fueron descritas por Arcila y Jaramillo (2003) como daños relacionados con la deficiente disponibilidad de agua en el suelo para la planta.

Para *Coffea arabica* L, se presume que el componente clave de la adaptación diferencial a la sequía entre cultivares es el control estomático de la pérdida de agua o la eficiencia en la extracción del agua del suelo (DaMatta y Ramalho, 2006), mientras que el ajuste osmótico o el aumento de la elasticidad de la pared celular, mantienen la turgencia y permiten que la actividad fisiológica se conserve durante períodos prolongados de sequía (Turner, 1996). Además, estas respuestas permiten que el potencial hídrico de la hoja disminuya, sin que se afecten la actividad metabólica de los tejidos y la elongación celular (Morgan, 1984) y al mismo tiempo hace que se dé una fuerza impulsora para la absorción de agua en raíces y otros órganos (Ennajeh *et al.*, 2009).

En todos los cultivares de café el ajuste estomático no es tan eficiente para contrarrestar el estrés hídrico, debido a que en algunos las hojas pierden turgencia a medida que el suelo se seca (Tounekti *et al.*, 2018). Sin embargo, cuando este ocurre de forma lenta, las plantas pueden generar respuestas de adaptación nivel morfológico y fisiológico (DaMatta, 2004), de forma que las plantas expuestas constantemente al déficit de agua se adapten más fácilmente que aquellas que han estado expuestas a un solo evento (Menezes-Silva *et al.*, 2017).

Otro reporte en el que ponen en evidencia las diferentes respuestas de la planta de café según sus cultivares al déficit hídrico, son los realizados por Molina *et al.* (2016), en el que mediante investigaciones enfocadas en la evaluación de variedades tolerantes a sequía, reportaron dos introducciones etíopes (E.480, ET.56 y E.177) como promisorias progenitoras para el desarrollo de una variedad tolerante al déficit hídrico, debido a que presentaron altura, área foliar, número de hojas, biomasa total, peso seco de la parte aérea y longitud de raíz primaria y secundaria, similar a las plantas con riego normal.

Estudios de riego deficitario en *C. arabica* y uso eficiente de agua en etapa de vivero, mostraron que las plantas en déficit, irrigadas en 40% con relación a los requerimientos hídricos teóricos (suelo a 0.33 MPa y evapotranspiración) tuvieron disminuciones de 17 y 15% en el número de nudos y área foliar en comparación con plantas irrigadas en 120%, y de 14 y 4% en las mismas variables pero con plantas en 80% de riego, que para el uso eficiente de agua fue el nivel de mejores resultados, en comparación con los de 40 y 120% (Mindia, 2021). Resultados similares al anterior habían sido reportados para plantas jóvenes de *C. arabica* por Tesfaye *et al.* (2008), Xiaogang *et al.* (2016) y González-Robaina *et al.* (2017).

El efecto del déficit hídrico sobre la respuesta estomática y los fotosistemas ha sido evaluado en *C. arabica* cv Colombia® y cv Castillo®. resistentes a la roya anaranjada. En la variedad Colombia, bajo condi-

ciones controladas, se observó que la humedad ambiental tiene mayor influencia en las relaciones de intercambio gaseoso que la humedad del suelo (Cano, 2000). Sin embargo, en condiciones no controladas, la humedad del suelo afectó la respuesta fotosintética de la planta, alcanzando un óptimo fotosintético cuando el suelo (andisol) presentó un $32\pm3\%$ de humedad y una disminución en el crecimiento y desarrollo de las plantas cuando el suelo presentó humedades fuera del rango del 15% al 45% (Gómez, 2000). Además, otros estudios indican que estas relaciones de intercambio gaseoso, también se ven afectadas por las caídas nocturnas de temperatura (Barros *et al.* 1997; Mosquera-Sánchez *et al.*, 1999) y las exposiciones a la luz directa del sol (López *et al.*, 1999), lo cual las hace

de utilidad como variables de apoyo para evaluar la respuesta de la planta al estrés hídrico, pero no específicas. Para la variedad Castillo®, en plantas de 13 meses de edad, se ha reportado la disminución en la conductancia estomática y cambios en el aparato fotosintético de las plantas después de 20 y 40 días de sequía, respectivamente (León-Burgos, *et al.* 2022).

Debido a la insuficiente información disponible acerca del efecto de la sequía progresiva en las plantas jóvenes de café (*C. arabica*) en Colombia, se realizó una investigación cuyo objetivo fue determinar el efecto del déficit hídrico en las variables de crecimiento y materia seca de plantas jóvenes de café, provenientes de una variedad resistente a la roya.

MATERIALES Y MÉTODOS 2

Ubicación

La investigación se realizó entre los años 2020 y 2021, con plantas jóvenes de *C. arabica* variedad Cenicafé 1, en las instalaciones de Planalto del Centro Nacional de Investigaciones del Café, Cenicafé, ubicado en Manizales, zona central de Colombia a $4^{\circ} 59' 26.83' N$ y $75^{\circ} 35' 27.09' W$, a una altitud de 1384 m. El montaje se realizó en una casa de malla bajo condiciones semi-controladas, que durante el tiempo de la

investigación presentó temperatura entre 18 y 30 °C, humedad relativa entre 40 y 80%, radiación fotosintéticamente activa máxima de $305 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ y un déficit de presión de vapor mínimo de 0.4 y máximo de 2.9 kPa.

Materiales

El material vegetal se obtuvo a partir de semillas comerciales de *C. arabica* varie-

dad Cenicafé 1 conformada por 8 progenies sembradas en suelo Typic Dystran-deps (andisol) proveniente de la estación experimental Naranjal-Cenicafé. Las propiedades químicas del suelo utilizado presentaron valores de pH 4.0 y un contenido de aluminio $1.1 \text{ cmol}^{(+)} \text{ kg}^{-1}$, materia orgánica 9.2% y fósforo 8.0 mg kg^{-1} . En bases intercambiables para potasio, calcio y magnesio los valores fueron 0.5, 1.0 y 0.2 mg kg^{-1} respectivamente. Otros elementos como azufre, hierro, manganeso, boro, zinc y cobre estuvieron presentes en cantidades de 15.2, 185.0, 9.0, 0.4, 3.0 y 4.7 mg kg^{-1} , respectivamente. En las propiedades físicas, la densidad aparente y real fue de 0.80 y 2.15 g cm^{-3} , respectivamente. En la distribución del tamaño de partículas las arenas representaron el 54%, los limos el 35% y las arcillas el 12%.

Para desarrollar el experimento se utilizaron materos cilíndricos tipo lisímetro, de acero inoxidable de 0.40 m de diámetro por 0.40 m de alto y para la aplicación del riego, tubos de PV de 0.4 m de longitud y 0.025 m de diámetro, microperforados y tapados en la base. Con el propósito de registrar el potencial mátrico y temperatura del suelo se emplearon sensores Teros (MPS 6 y MPS 21) y tensiómetros marca Irrometer. A fin de monitorear las condiciones climáticas de la casa de malla se empleó un sensor HMP60 para temperatura ambiental y humedad relativa, y un SQ-110 para radiación fotosintéticamente activa. Tanto las variables edáficas como climáticas se registraron cada cinco minutos.

Método estadístico

El efecto de la sequía se evaluó a través del riego deficitario (RD), mediante el control de cinco rangos de potencial mátrico del suelo que fueron desde $-20\pm10 \text{ kPa}$ (tratamiento control) hasta $-1600\pm100 \text{ kPa}$, bajo un diseño de bloques completamente aleatorios de seis bloques y cinco tratamientos, con unidad experimental de una planta. El factor de bloqueo fue el número de hojas por planta a los 99 días después del trasplante y la variable de interés materia seca total de la planta. El bloqueo se realizó debido a que la variedad Cenicafé 1 está conformada por varias progenies, que, si bien como variedad tienen una arquitectura definida, entre ellas pueden presentar variaciones en el crecimiento.

Instalación

Cuando las plantas alcanzaron tres meses de edad, correspondientes al tiempo en el que emitieron el primer par de hojas verdaderas, se trasplantaron a los materos tipo lisímetro. A cada matero se adicionaron 50 kg de suelo con humedad de 44.5%, hasta una altura de 0.35 m, para un volumen de 0.044 m^3 , con lo que se procuró conservar la densidad aparente del suelo en campo (800 kg.m^{-3}). También, se instalaron los sensores de potencial mátrico y temperatura del suelo marca Teros (MPS 6 y MPS 21), a una profundidad de 0.15 a 0.20 m, que corresponde al rango

de profundidad del perfil del suelo, en el que la planta de café presenta el mayor número de raíces absorbentes (Rendón y Giraldo, 2019).

Se instalaron los tubos de PVC perforados (cinco por planta) alrededor de la planta, con el fin de que la aplicación del riego fuera lo más homogénea posible en todo el volumen de suelo. Un mes antes del trasplante se hizo un ajuste de pH del suelo de 4.0 a 5.1 con caliza dolomítica, según las recomendaciones de Sadeghian (2008).

Las plantas se dejaron en adaptación durante cuatro meses y medio en la casa de malla. El manejo agronómico fue el recomendado por Cenicafé y la fertilización se realizó según las recomendaciones de Sadeghian (2008). En los primeros 45 días de la etapa de adaptación, las plantas se mantuvieron con un potencial mátrico en el suelo entre -30 y -10 kPa, que se logró con aplicaciones semanales de 1.5 L de agua por planta y en los 90 días siguientes se mantuvieron en dicho potencial con aplicaciones semanales de 2.0 L de agua

por planta. Los riegos se realizaron por medio de los tubos de PCV perforados, mencionados en los materiales.

Aplicación de tratamientos

Pasados 132 días de aclimatación, se inició la aplicación de los tratamientos (T) de riego deficitario, mediante control de potencial mátrico: Testigo: -20 ± 10 kPa, T1: -100 ± 10 kPa, T2: -300 ± 50 kPa, T3: -500 ± 50 kPa y T4: -1600 ± 100 kPa. Dado que la metodología respondió a un déficit progresivo, el potencial mátrico de T1 se alcanzó a los 24 días de déficit, el T2 a los 34 días de déficit, el T3 a los 42 días de déficit y el T4 a los 71 días (Figura 1). Para mantener las plantas el mayor número de días posibles en los rangos establecidos en cada tratamiento, se aplicaron las cantidades de agua que se muestran en la Tabla 1, las cuales fueron desde 271.44 L para las 6 plantas testigo, distribuidos en 198 riegos y 4.05 L para las 6 plantas del T4 distribuidos en 70 riegos.

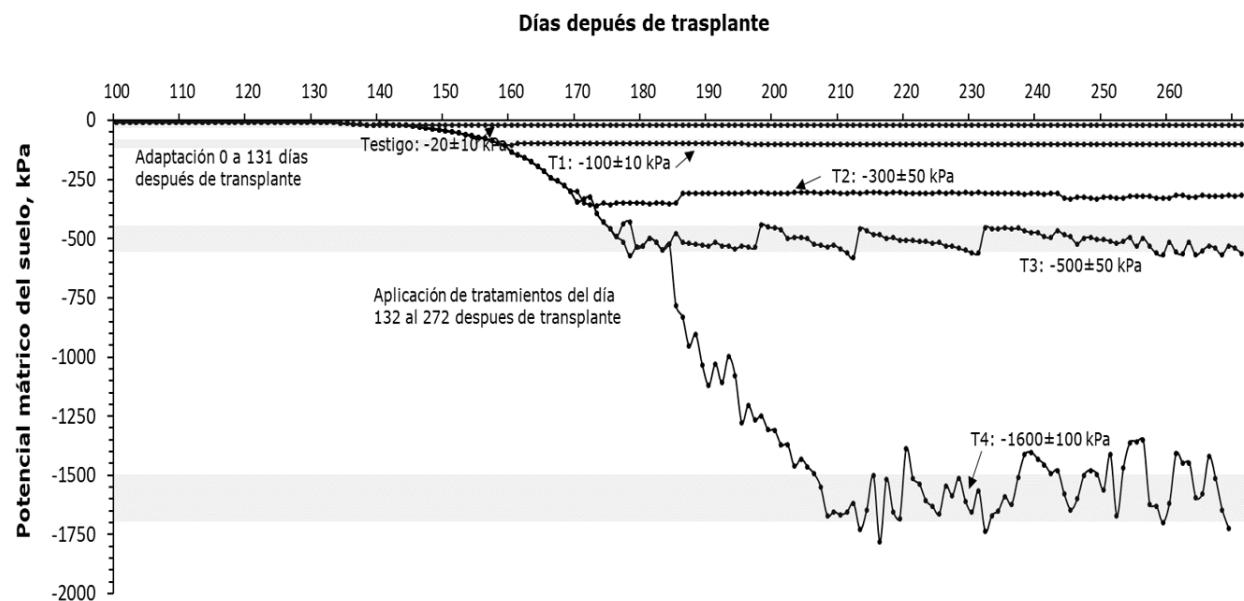


Figura 1. Valores promedio de los potenciales mátricos del suelo en los cinco tratamientos (promedio de 6 sesores por tratamiento, con medición cada cinco minutos)

Fuente: autores.

■ Tabla 1. Cantidad de agua aplicada (L) para mantener los tratamientos de riego deficitario en los rangos de potencial mátrico establecidos

Tratamiento	Días después del trasplante (DDT)					Total, L	Número de riegos		
	132 a 153	154 a 184	185 a 215	216 a 245	246 a 272				
	Días de aplicación de tratamientos (DAT)								
	0 - 21	22 - 52	53 - 83	84 - 113	114 - 140				
Litros de agua aplicados por tratamiento (6 plantas)									
Testigo (-20±10 kPa)	22.80	38.04	60.40	74.60	75.60	271.44	198		
T1 (-100±10 kPa)	0.30	10.37	27.03	34.18	33.26	105.14	286		
T2 (-300±50 kPa)	0.00	12.55	23.46	18.09	15.83	69.48	247		
T3 (-500±50 kPa)	0.00	1.23	7.30	10.35	8.48	27.36	147		
T4 (-1600±100 kPa)	0.00	0.00	0.34	2.28	1.43	4.05	70		

Fuente: autores.

Evaluación de variables

La evaluación se enfocó en las variables de crecimiento, debido a que según la literatura el efecto de la sequía severa en las plantas se refleja en dichas variables. La principal fue biomasa seca total (hojas, ramas, tallos y raíces) y se cuantificó 140 días después de haber iniciado la aplicación de los tratamientos (DAT), tiempo que corresponde a los 272 días después de trasplante (DDT).

En la casa de malla se separó la parte área de las raíces, en el laboratorio se lavaron las raíces con agua para retirar los residuos de suelo y se separaron hojas, tallos y ramas. Cada una de las partes de la planta se secó por separado en una estufa de ventilación forzada a 60 °C por 72 horas y se pesaron en balanza de precisión con legibilidad de 0.1 g.

Como variables complementarias se midió el área foliar según la metodología propuesta por Unigarro-Muñoz *et al.* (2015), altura de la planta, diámetro ecuatorial, número de cruces, nudos y hojas. Para las últimas cinco variables las mediciones se realizaron a los 50, 99, 132, 175, 209, 245 y 272 DDT, en el que los 132 DDT corresponden al día 0 después de aplicar los tratamientos (DAT), los 175 DDT a 43 DAT, 209 DDT a 113 DAT y 272 DDT a 140 DAT. Las lecturas del día 99 DDT se tomaron como insumo para el bloqueo.

Análisis de resultados

Tanto para la variable principal como para las complementarias, se realizó estadística descriptiva y con el fin de comparar el efecto de los tratamientos en las variables analizadas se realizó el análisis de varianza en dos vías para las variables de crecimiento en el tiempo y en una vía para las de materia seca, ambas para un diseño experimental de seis bloques y cinco tratamientos, con una significancia del 95%. Para las variables altura, diámetro ecuatorial, numero de hojas, cruces y nudos, los grados de libertad para tratamientos fue de cuatro, para DAT tres, para la interacción entre estas de 12 y para residuos 100; para área foliar cuatro en tratamientos, dos para DAT, ocho para la interacción entre estas y 75 en residuos. En los casos en los que el análisis de varianza indicó efecto de los tratamientos se realizó la prueba de comparación de medias de Duncan, con un nivel de significancia del 5%. Se probaron los supuestos asociados con la homogeneidad de la varianza por medio de la prueba de Leven al 95% y normalidad por medio de la prueba z para asimetría y curtosis al 95%. En el análisis de la información se utilizó el programa estadístico Statgraphics.

También se buscaron los modelos matemáticos que explicaron el efecto del potencial mátrico del suelo en la materia seca total, de raíces, tallo, ramas y hojas. Para

ello el potencial mátrico del suelo se tomó como tensión del suelo (potencial mátrico del suelo multiplicado por -1). Con los modelos obtenidos se realizó una figura de rendimientos relativos y se determinó

el potencial mátrico del suelo en el que se generan pérdidas de hasta un 10% a causa de la sequía. Se empleó el software SigmaPlot versión 10.

3

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Variables de crecimiento

El crecimiento de las plantas se vio afectado por los tratamientos en el tiempo y la interacción de estos, tal como se aprecia en la Figura 2 de interacciones y la Tabla

2 de valores P: las diferencias en altura, diámetro ecuatorial, número de hojas y área foliar indicadas en los análisis de varianza a partir de las evaluaciones de los 77 DAT, y en número de cruces y nudos en las de los 113 DAT (Tabla 3 y Figura 3).

■ **Tabla 2.** Valores P, producto del análisis de varianza en dos vías para los tratamientos y los días de aplicación de los tratamientos (DAT).

Fuente	Altura		Número de hojas		Diámetro ecuatorial		Número de cruces		Número de ramas		Número de nudos		Área foliar	
	Razón-F	Valor-P	Razón-F	Valor-P	Razón-F	Valor-P	Razón-F	Valor-P	Razón-F	Valor-P	Razón-F	Valor-P	Razón-F	Valor-P
Efectos principales														
A: Tratamiento	21,72	0,0000	20,31	0,0000	22,84	0,0000	11,68	0,0000	11,68	0,0000	17,57	0,0000	28,07	0,0000
B:DAT	24,49	0,0000	22,18	0,0000	19,59	0,0000	26,96	0,0000	26,96	0,0000	22,32	0,0000	12,60	0,0000
Interacciones														
AB	3,45	0,0003	4,07	0,0000	2,37	0,0101	2,48	0,0069	2,48	0,0069	3,62	0,0002	3,77	0,0009

Fuente: autores.

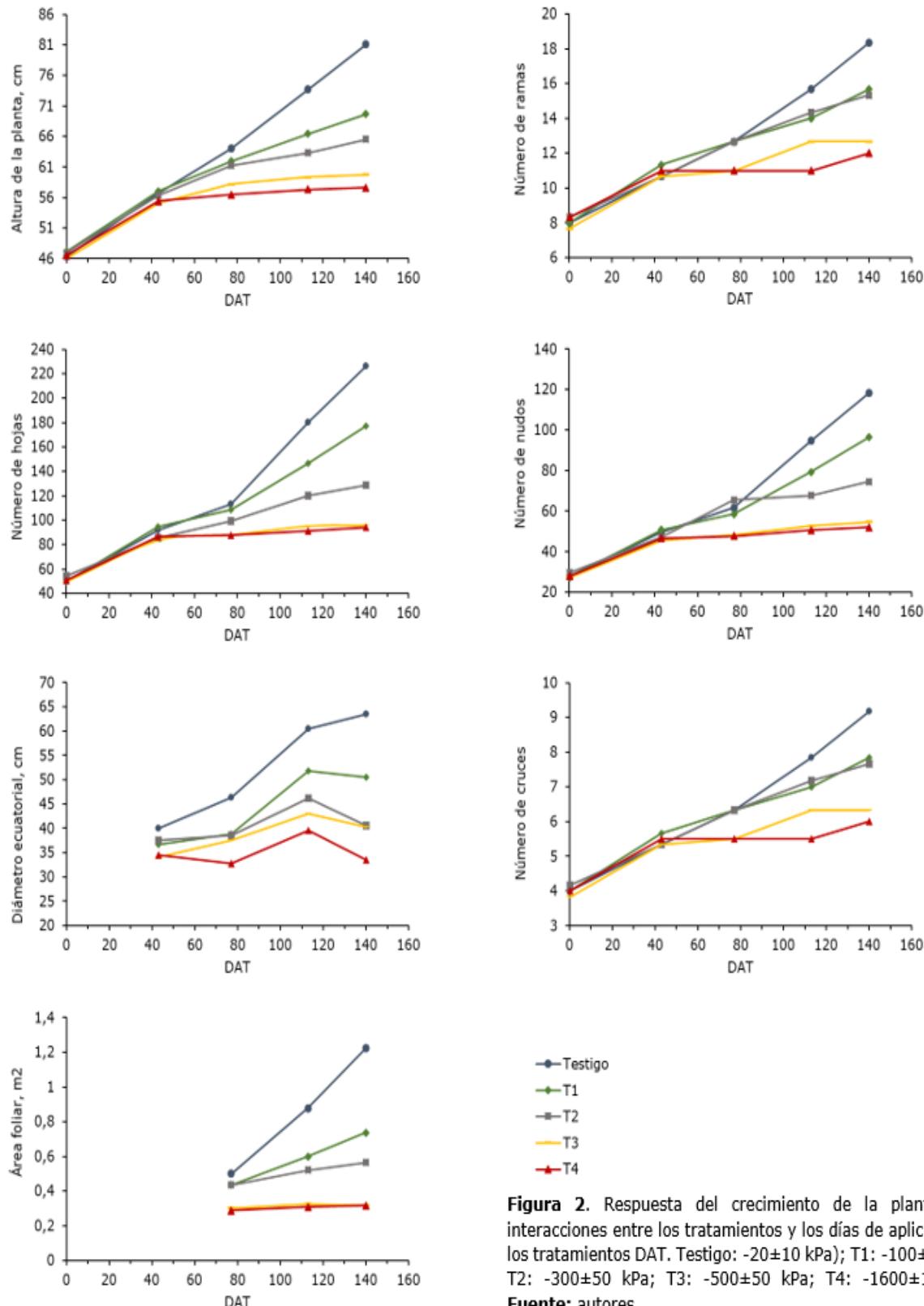


Figura 2. Respuesta del crecimiento de la planta a la interacciones entre los tratamientos y los días de aplicación de los tratamientos DAT. Testigo: -20 ± 10 kPa); T1: -100 ± 50 kPa; T2: -300 ± 50 kPa; T3: -500 ± 50 kPa; T4: -1600 ± 100 kPa

Fuente: autores.

El efecto en la altura de la planta mostró diferencias entre el testigo y el tratamiento más restrictivo en agua (T4). Esta condición fue más acentuada al pasar el tiempo, pues a los 113 DAT los tratamientos T2, T3 y T4 fueron diferentes al testigo y a los 140 DAT. La diferencia se dio con todos los tratamientos (Tabla 3, Figura 2). El diámetro ecuatorial tuvo una dinámica similar a la altura, en el que el efecto se

reflejó por primera vez en la evaluación de los 77 DAT, con diferencia entre el testigo y T4 y en las evaluaciones siguientes (113 y 140 DAT) la diferencia fue con T2, T3 y T4 y en contraste con la altura, T1 fue igual el testigo en todas las evaluaciones (Tabla 3, Figura 2), resultados que coinciden con los presentados por Tesfaye *et al.* (2008) y González-Robaina *et al.* (2017), entre otros.



Izquierda superior: hojas.

Derecha superior: ramas y tallos.

Izquierda inferior: tallos.

T1 (testigo -20 ± 10 kPa); T2 (-100 ± 50 kPa); T3 (-300 ± 50 kPa); T4 (-500 ± 50 kPa); T5 -1600 ± 100 kPa).

Figura 3. Efecto del déficit hídrico en las diferentes partes de la planta de café variedad Cenicafé 1, en etapa de establecimiento, tras 140 días de aplicación de tratamientos de sequía

Fuente: autores.

Para el número de hojas, el efecto de los tratamientos se evidenció a partir de la lectura de los 77 DAT, en la que T3 y T4 fueron mayores que el testigo, al igual que el área foliar. En las lecturas de los 113 y 140 DAT el número de hojas fue diferente en los tratamientos T2, T3 y T4 frente al testigo. En cuanto al área foliar, sólo hasta la evaluación de los 140 DAT se presentaron diferencias de todos los tratamientos frente al testigo (Tabla 3, Figura 2). El efecto de los tratamientos en el número de cruces empezó a evidenciarse a los 113 DAT, con diferencia del testigo

con T3 y T4, situación que se mantuvo en la lectura de 140 DAT, mientras que en número de nudos las evaluaciones de los 113 y 140 DAT presentaron diferencias del testigo con respecto a T2, T3 y T4 (Tabla 3, Figura 2). La disminución en el número de nudos y el área foliar a medida que el déficit hídrico aumenta también fue reportada por Minda (2021), Xiaogang *et al.* (2016) y González-Robaina *et al.* (2017). Según Morgan (1984), dichas diferencias en la elongación celular dejan ver que es un comportamiento contrario al que se da para plantas con potencial de adaptación.

■ Tabla 3. Resumen estadístico y comparación de medias entre tratamientos, para las variables de crecimiento en el tiempo

Variable	DAT	TRATAMIENTOS				
		Testigo -20±10 kPa	T1 -100±50 kPa	T2 -300±50 kPa	T3 -500±50 kPa	T4 -1600±100 kPa
Altura de la planta, cm	43	56.75±2.36	57.00±1.46	56.33±2.14	55.08±1.61	55.42±1.48
	77	64.00±2.64a	61.92±1.80ab	61.25±2.14ab	58.17±1.60ab	56.42±1.26 b
	113	73.67±2.66a	66.42±2.91ab	63.33±1.41bc	59.33±1.53bc	57.33±1.25c
	140	81.08±2.99a	69.67±3.83b	65.50±1.34bc	59.75±1.44c	57.58±1.23c
Diámetro ecuatorial, cm	43	40.00±2.96	36.67±1.61	37.50±1.71	34.00±1.37	34.50±3.02
	77	46.33±4.07a	38.83±1.64ab	38.50±2.43ab	37.50±1.77ab	32.83±1.49b
	113	60.50±4.40a	51.83±3.70ab	46.17±1.96b	43.00±1.34b	39.50±1.75b
	140	63.50±5.02a	50.50±4.57ab	40.50±2.35bc	40.33±2.32bc	33.50±1.23c
Número de hojas	43	91.67±3.77	94.50±7.67	85.67±6.01	83.50±4.96	86.33±5.48
	77	113.17±5.05a	108.33±10.51a	99.50±4.24ab	88.00±5.30b	87.50±5.14b
	113	180.00±10.91a	146.33±26.40ab	120.00±7.52bc	95.17±5.56c	91.00±5.18c
	140	226.00±15.20a	177.17±35.88ab	128.83±7.18bc	95.83±5.45c	93.83±5.22c
Área foliar, m ²	77	0.50±0.07a	0.44±0.03ab	0.44±0.06ab	0.30±0.03b	0.29±0.05b
	113	0.88±0.10a	0.60±0.09a	0.52±0.08ab	0.33±0.03b	0.31±0.05b
	140	1.22±0.11a	0.74±0.15b	0.56±0.09bc	0.32±0.02c	0.32±0.05c
Número de cruces	43	5.33±0.33	5.67±0.33	5.33±0.21	5.33±0.21	5.50±0.22
	77	6.33±0.33	6.33±0.42	6.33±0.21	5.50±0.34	5.50±0.22
	113	7.83±0.17a	7.00±0.68ab	7.17±0.17ab	6.33±0.33bc	5.50±0.22c
	140	9.17±0.31a	7.83±0.95ab	7.67±0.33abc	6.33±0.33bc	6.00±0.00c

Número de nudos	43	49.50±1.84	50.67±3.94	47.17±3.28	45.33±2.59	46.50±2.67
	77	61.67±2.69	58.50±5.28	65.50±11.71	48.17±2.75	47.67±2.50
	113	94.67±5.46a	79.33±13.11ab	67.67±3.67bc	52.67±3.05c	50.50±2.53c
	140	118.17±7.67a	96.50±17.68ab	74.50±2.87bc	54.50±2.77c	52.00±2.21c

DAT= días después de aplicación de los tratamientos. Cada letra significa un grupo homogéneo según la prueba de múltiples rangos de Duncan con significancia al 5% y se lee por filas debido a que muestra la diferencias entre tratamientos. Los datos que no presentan letras se asocian con aquellas evaluaciones en las que, según el análisis de varianza, no hubo efecto de los tratamientos en las variables, por lo cual pertenecen al mismo grupo homogéneo

Fuente: autores.

Materia seca

El promedio de la materia seca total de la planta estuvo entre 223.44±23.3 y 96.17±4.9 g, correspondientes al testigo y T4, respectivamente. Para la raíz, los valores estuvieron entre 60.25±6.07 y 31.22±1.83 g, el tallo entre 29.54±3.65 y 14.33±0.56 g, las ramas de 25.88±3.74 y 8.29±0.66 g, y las hojas de 107.77±10.44 a 42.34±3.65 g, en todos los casos el primer valor fue para el testigo y el segundo para T4 (Tabla 4). Estos resultados de respuesta de la planta de *C. arabica* a la sequía, concuerdan con los presentados por Tesfaye *et al.* (2008) y Minda (2021), entre otros; y distan de los de Chemura *et al.* (2014), quienes en *C. arabica* de 8 meses de edad no encontraron cambios ni en la biomasa seca aérea ni de raíces, lo cual se puede explicar en que ellos realizaron la investigación hasta los 21 y 28 días de sequía y en la presente investigación los cambios se empezaron a evidenciar a los 77 y 113 días de estar sometidas las plantas a sequía (Tabla 3).

Tanto la materia seca total como sus partes se vieron afectadas por los trata-

mientos, lo que indica que las plantas incluidas en el estudio son sensibles al déficit hídrico. En la mayoría de los casos los tratamientos difirieron del testigo y T4 (prueba de Duncan al 5%). Entre tratamientos, T1 y T2 se ubicaron en el mismo grupo homogéneo para cada una de las partes de la planta y la suma de estas (Tabla 4); a su vez, T2 y T3 se ubicaron en el mismo grupo homogéneo para la materia seca total, ramas y hojas; y entre T3 y T4 la materia seca de tallos, ramas, hojas y raíz fueron estadísticamente iguales y diferente en materia seca total. Esto indica que las variaciones fueron progresivas, con disminuciones en la materia seca a medida que el agua era más restrictiva para la planta, condición que también se corroboró con los modelos tipo logarítmico que se presentan en la Figura 4. Los modelos de respuesta tipo logarítmico se asocian con la no linealidad que presentan los cultivos arbóreos al déficit hídrico mencionados por Moriana *et al.* (2003) para olivo, y por Fereres y Soriano (2007) al compararlos de manera generalizada con la respuesta lineal de los cultivos anuales.

■ Tabla 4. Valores promedio, error estándar y grupo homogéneo de la materia seca de las partes de la planta, por tratamiento (n=6)

Parte de la planta	Testigo	T1	T2	T3	T4
	materia seca, g				
Total	223.44±23.30 ^a	157.27±21.39 ^b	142.31±10.96 ^{bc}	105.84±6.82 ^{cd}	96.17±4.97 ^e
Tallo	29.54±3.65 ^a	21.53±2.44 ^b	20.93±1.29 ^b	17.15±1.35 ^{bc}	14.33±0.56 ^c
Ramas	25.88±3.74 ^a	15.85±2.74 ^b	12.19±1.47 ^{bc}	9.26±0.83 ^c	8.29±0.66 ^c
Hojas	107.77±10.44 ^a	69.03±12.09 ^b	59.18±5.94 ^{bc}	43.41±2.57 ^c	42.34±3.65 ^c
Raíz	60.25±6.07 ^a	50.87±5.22 ^a	50.02±3.28 ^a	36.01±4.70 ^b	31.22±1.83 ^b

Cada letra significa un grupo homogéneo según la prueba de múltiples rangos de Duncan con significancia al 5%.

Fuente: autores.

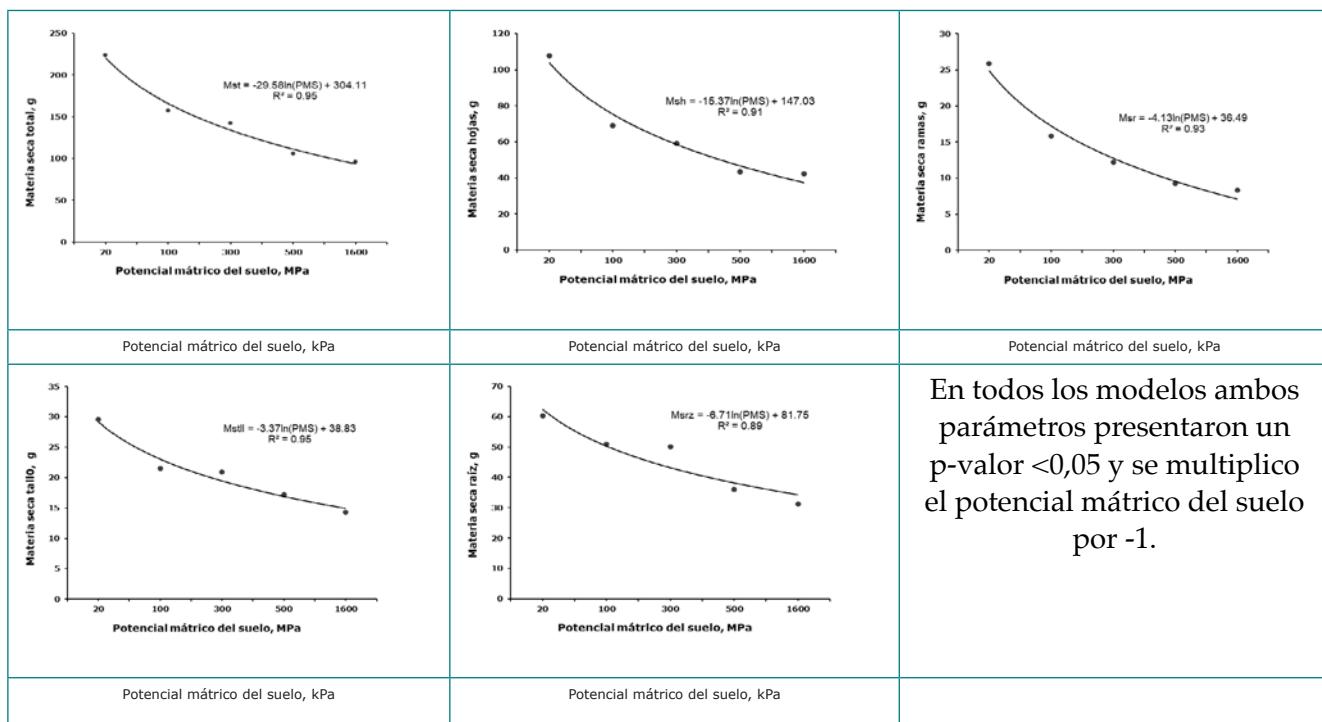


Figura 4. Materia seca total, hojas, ramas, tallo y raíz, de la planta joven de café en respuesta al déficit hídrico

Fuente: autores.

Las relaciones entre la materia seca de la raíz y la parte aérea (hojas, ramas y tallo) fue de 1 a 3 en el testigo y de 1 a 2 en los tratamientos, sin diferencia entre los tratamientos para estas relaciones, lo que difiere de lo presentado por Tesfaye *et al.* (2008), quienes advierten que la sequía genera una disminución en esta relación, es decir, ocurre un aumento en la masa seca de las raíces de las plantas sometidas a déficit hídrico. En cuanto a raíces, además de las variaciones en materia seca, se observaron cambios en longitud y abundancia (Figura 5), lo que concuerda con lo expuesto por Liang *et al.* (2017); Fry *et al.* (2018), como respuesta de las plantas a la sequía prolongada.



Figura 5. Efecto del déficit hídrico en las raíces de las plantas de café variedad Cenicafé 1, en etapa de establecimiento, tras 140 días de aplicación de tratamientos. T1 (testigo -20 ± 10 kPa); T2 (-100 ± 50 kPa); T3 (-300 ± 50 kPa); T4 (-500 ± 50 kPa); T5 (-1600 ± 100 kPa)

Fuente: autores.

Los efectos de la sequía presentados en esta investigación muestran que en las

plantas jóvenes de café (*C. arabica*), la tasa de crecimiento disminuye en respuesta a los diferentes niveles de déficit hídrico, lo cual indica que no se vio reflejado un posible aumento en la fuerza de extracción de agua, lo anterior sustentado en que no se detectaron disminuciones del potencial mátrico del suelo que indicara que la planta estaba tomando el agua del suelo al mismo ritmo que en potenciales mátricos más bajos, atributo que sería considerado como un componente de adaptación para algunas plantas (Turner, 1996) y genotipos de café (DaMatta y Ramalho, 2006). Estos resultados también se respaldan en que hay cultivares de café que no son tan eficientes para contrarrestar el estrés hídrico (Tounekti *et al.*, 2018), y que la disminución en el crecimiento de las plantas afectadas hace que a su vez la fuerza impulsora para la absorción de agua en raíces y otros órganos sea menor en comparación con las plantas irrigadas, que por tener un mayor crecimiento tienen una mayor fuerza de extracción (Ennajeh *et al.*, 2009).

Rendimiento relativo

En términos de rendimientos relativos, en el que los valores de materia seca del testigo (tratamiento irrigado) fueron tomados como 100%, se encontró que los órganos más afectados fueron las ramas, con reducciones que van desde el 39% para el tratamiento considerado como menos limitante, hasta 68% para la condición más estresante; luego siguen las hojas con reducciones desde

36 hasta 61%, los que menos reducciones presentaron fueron los tallos con valores entre 27 y 52%, las raíces con reducciones de 16 a 48%; la materia seca total presentó reducciones entre el 30 y 57% y se ubicó en la parte intermedia de reducción de en comparación con los diferentes órganos (Figura 6).

Al tener como referencia los valores relativos de la Figura 6, se presume que las pérdidas del 10% en la producción de materia seca total y sus partes, se da aproximadamente a una tensión de -40 kPa en un periodo mantenido de 120 días, teniendo en cuenta que dicho potencial se alcanza en menos de 24 días (Figura 2). Con relación a la afectación de las partes, hojas y ramas presentan mayor deterioro en el rendimiento en comparación con ramas y raíz. Además, según las tendencias de las curvas, las mayores pérdidas se dan apro-

ximadamente hasta los -200 kPa en un periodo mantenido de 110 días, teniendo en cuenta que dicha tensión se alcanzó aproximadamente a los 30 días (Figura 2); sin embargo, las pérdidas se incrementan a medida que se da una disminución de la disponibilidad de agua en el suelo, el cual se da a través del tiempo.

Los resultados de crecimiento se pueden asociar con las respuestas de intercambio de gases presentadas por León-Burgos, *et al.* (2022) para plantas de la variedad Castillo® (*C. arabica*) de 13 meses de edad en el que advierten que la respuesta de la planta inicia pasados 20 días de la sequía y que los cambios en el aparato fotosintético se dan a los 40. Este último tiempo coincide con la disminución del 10% del rendimiento propuesta en esta investigación para condiciones similares de clima y tipo de suelo.

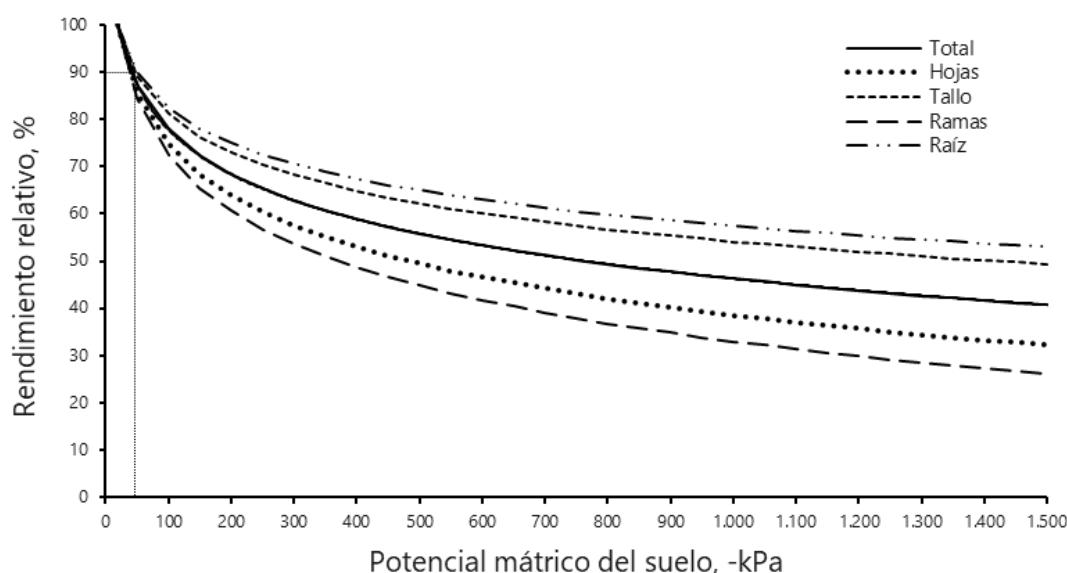


Figura 6. Rendimientos relativos para la materia seca del total de la planta, hojas, tallo, ramas y raíz

Fuente: autores.



4 CONCLUSIONES

Debido a la disminución en el rendimiento relativo de hasta en 57% y el retardo en el crecimiento, reflejado con diferencias de 30 cm en altura y diámetro ecuatorial, a causa de la disminución de agua en el suelo, se concluye que las plantas de *C. arabica* son sensibles al déficit hídrico en su etapa de establecimiento y bajo las condiciones de estudio.

La sequía prolongada por 113 días ocasionó disminución en el número de cruces y nudos en las plantas de la variedad Cenicafé 1, en etapa de establecimiento. Este deterioro puede reducirse con la suspensión de la sequía antes de 40 días, periodo después del cual se evidenciaron disminuciones en altura, diámetro ecuatorial,

número de hojas y área foliar, además de determinarse como el tiempo en el cual se da una pérdida del 10% del rendimiento de la biomasa.

El rango agua en el suelo, disponible para las plantas de café variedad Cenicafé 1 en etapa de establecimiento, se debe estimar teniendo como límite inferior los -300 ± 50 kPa y no hasta los -1500 kPa, debido a que después de dicho potencial mátrico, la planta presenta las mayores disminuciones en rendimiento y crecimiento; además, no muestra diferencias en las variables de crecimiento ni en la materia seca de la parte aérea y raíces, entre los potenciales de -500 ± 50 y -1600 ± 100 kPa.

■ CONTRIBUCIÓN DE LA AUTORÍA

Luz Adriana Lince Salazar: metodología, investigación, análisis de datos, conceptualización, escritura y edición. **Siavosh Sadeghian Khalajabadi:** análisis de datos y revisión del documento. **Ninibeth Gibelli Sarmiento Herrera:** metodología, análisis de datos, escritura.

AGRADECIMIENTOS ■

Los autores expresan sus agradecimientos a Cenicafé – Federación Nacional de cafeteros de Colombia, por el apoyo financiero en la investigación. A Juan Pablo Carvajal por la automatización y transmisión de los datos de las variables am-

bientales y de potencial mátrico del suelo; Carlos Andrés Unigarro por asesorar la evaluación del área foliar; Jaroliver Cardona y Arturo Gómez por el acompañamiento en el montaje, evaluación de variables y mantenimiento de las plantas.

LITERATURA CITADA ■

Ahluwalia, O., Singh, P.C., and Bhatia, R. (2021). A review on drought stress in plants: Implications, mitigation and the role of plant growth promoting rhizobacteria. *Resources, Environment and Sustainability*, 100032. <https://doi.org/10.1016/j.resenv.2021.100032>

Arcila, J. y Jaramillo, A. (2003). Relación entre la humedad del suelo, la floración y el desarrollo del fruto del cafeto. *Avances Técnicos Cenicafé*, 311, 1-8.

Barros, S.R., Da Se Mota, J.W., DaMatta, F.N., and Maestri, M. (1997). Decline of vegetative growth in Coffea arabica L. in relation to leaf temperature, water potential and stomatal conductance. *Field Crop Research*, 54(1), 65-72. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(97\)00045-2](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(97)00045-2)

Cavatte, P.C., Martins, S.C., Morais, L.E., Silva, P.E., and DaMatta, F.M. (2012). The physiology of abiotic stresses. In *Plant*

breeding for abiotic stress tolerance (pp. 21-51). https://doi.org/10.1007/978-3-642-30553-5_3

Chemura, A., Mahoya, C., Chidoko, P., and Kutywayo, D. (2014). Effect of soil moisture deficit stress on biomass accumulation of four coffee (*Coffea arabica*) varieties in Zimbabwe. *International Scholarly Research Notices*, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/767312>

Chiappero, J., del Rosario Cappellari, L., Alderete, L.G.S., Palermo, T.B., and Banchio, E. (2019). Plant growth promoting rhizobacteria improve the antioxidant status in *Mentha piperita* grown under drought stress leading to an enhancement of plant growth and total phenolic content. *Industrial Crops and Products*, 139, 111553. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111553>

- DaMatta, F.M. (2004). Exploring drought tolerance in coffee: a physiological approach with some insights for plant breeding. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 16(1), 1-6. <https://doi.org/10.1590/S1677-04202004000100001>
- DaMatta, F.M., and Ramalho, J.D.C. (2006). Impacts of drought and temperature stress on coffee physiology and production: a review. *Brazilian journal of plant physiology*, 18(1), 55-81. <https://doi.org/10.1590/S1677-04202006000100006>
- Ennajeh, M., Vadel, A.M., and Khemira, H. (2009). Osmoregulation and osmoprotection in the leaf cells of two olive cultivars subjected to severe water deficit. *Acta physiologiae plantarum*, 31(4), 711-721. <https://doi.org/10.1007/s11738-009-0283-6>
- Etesami, H., and Maheshwari, D.K. (2018). Use of plant growth promoting rhizobacteria (PGPRs) with multiple plant growth promoting traits in stress agriculture: Action mechanisms and prospects. *Eco-toxicology and environmental safety*, 156, 225-246. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.03.013>
- Fereres, E., and Soriano, M.A. (2007). Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of experimental botany*, 58(2), 147-159. <https://doi.org/10.1093/jxb/erl165>
- Fry, E.L., Johnson, G.N., Hall, A.L., Pritchard, W.J., Bullock, J.M., and Bardgett, R.D. (2018). Drought neutralises plant-soil feedback of two mesic grassland forbs. *Oecologia*, 186(4), 1113-1125. <https://doi.org/10.1007/s00442-018-4082-x>
- Gómez, M.O. (2000). *Efecto del estrés hídrico sobre la actividad fotosintética en la planta de café (Coffea arabica L. cv, Colombia)*. [Tesis de Grado, Ingería Agronómica]. Universidad de Caldas.
- González-Robaina, F., Cisneros-Zayas, E. y Montilla, E. (2017). Respuesta al déficit hídrico del cafeto (*Coffea arabica* L.) en diferentes fases de desarrollo. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 26(3), 4-11. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-00542017000300001&lng=es&tlang=es
- Jaramillo, A. (2005). *Clima andino y café en Colombia*. Chinchiná, Cenicafé.
- Kaur, G., and Asthir, B. (2017). Molecular responses to drought stress in plants. *Biol Plant* 61, 201–209. <https://doi.org/10.1007/s10535-016-0700-9>
- León-Burgos, A.F., Unigarro, C., and Balaguera-López, H.E. (2022). Can prolonged conditions of water deficit alter photosynthetic performance and water relations of coffee plants in central-west Colombian? *South African Journal of Botany*, 149, 366-375. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2022.06.034>
- Liang, C., Wang, W., Wang, J., Ma, J., Li, C., Zhou, F., Zhang Y.Y., Zhang, L., Li, W., and Huang, X. (2017). Identification of differentially expressed genes in sunflower (*Helianthus annuus*) leaves and roots under drought stress by RNA

- sequencing. *Botanical studies*, 58(42). <https://doi.org/10.1186/s40529-017-0197-3>
- Liu, F., Ma, H., Peng, L., Du, Z., Ma, B., and Liu, X. (2019). Effect of the inoculation of plant growth-promoting rhizobacteria on the photosynthetic characteristics of *Sambucus williamsii* Hance container seedlings under drought stress. *AMB Expr.*, 9, 169. <https://doi.org/10.1186/s13568-019-0899-x>
- Liu, X., Li, R., Han, Z., Yang, Q., and Jiang, Z. (2021). Effects of deficit irrigation on soil microorganisms and growth of Arabica coffee (*Coffea arabica* L.) under different shading cultivation modes. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 14(6), 99-108. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20211406.5442>
- López, J.C. (1999). Comportamiento fotosintético diario de la hoja del cafeto (*Coffea arabica* L.) cv. Colombia. *Informe anual de labores de la disciplina de fisiología vegetal*. Chinchiná, Cenicafé.
- Menezes-Silva, P.E., Sanglard, L.M., Ávila, R.T., Morais, L.E., Martins, S.C., Nobres, P., Patreze, C.M., Ferreira, M.A., Araújo, W.L., Fernie, A.L., and DaMatta, F.M. (2017). Photosynthetic and metabolic acclimation to repeated drought events play key roles in drought tolerance in coffee. *Journal of experimental botany*, 68(15), 4309-4322. <https://doi.org/10.1093/jxb/erx211>
- Minda, T. (2021). Effect of Deficit Irrigation on Dry Matter Yield and Water Productivity of Young Harerghe Coffee Genotypes at Jimma, Southwest Ethiopia. *American Journal of Agriculture and Forestry*, 9(4), 246-252. <https://doi.org/10.11648/j.ajaf.20210904.21>
- Molden, D., Murray-Rust, H., Sakthivadivel, R., and Makin, I. (2003). A water-productivity framework for understanding and action. In *Water productivity in agriculture: Limits and opportunities for improvement* (pp. 1-18). Cabi Publishing. <https://doi.org/10.1079/9780851996691.0001>
- Molina, D.M., Ramírez, V.H. y Cortina, H.A. (2016). Comportamiento de accesiones de *Coffea arabica* sometidas a déficit de humedad del suelo. *Cenicafé* 67(1), 41-54. <https://doi.org/10.38141/10778/67102>
- Morgan, J.M. (1984). Osmoregulation and water stress in higher plants. *Annual review of plant physiology*, 35(1), 299-319. <https://doi.org/10.1146/annurev.pp.35.060184.001503>
- Moriana, A., Orgaz, F., Pastor, M., and Fereres, E. (2003). Yield responses of a mature olive orchard to water deficits. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 128(3), 425-431. <https://doi.org/10.21273/JASHS.128.3.0425>
- Mosquera-Sánchez, L.P., Riaño, N.M., Arcila, J. y Ponce, C.A. (1999). Fotosíntesis, respiración y fotorrespiración en hojas de café *Coffea* sp. *Cenicafé*, 50(3), 215-221. <https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/4197/1/arc050%2803%29215-221.pdf>

Ngumbi, E., and Kloepper, J. (2016). Bacterial-mediated drought tolerance: current and prospects. *Applied Soil Ecology*, 105, 109-125. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2016.04.009>

Rendón, J.R. y Giraldo, A. (2019). Distribución de raíces en café variedad Castillo® bajo dos arreglos espaciales. *Revista Cenicafé* 70(1), 7-17. <https://doi.org/10.38141/10778/70101>

Richards, L.A., and Weaver, L.R. (1943). Fifteen-atmosphere percentage as related to the permanent wilting percentage. *Soil Sci.*, 56, 331-340. <https://doi.org/10.1097/00010694-194311000-00002>

Sadeghian, S. (2008). Fertilidad del suelo y nutrición del café en Colombia. *Boletín Técnico*, 32.

Sadeghian, S., Jaramillo, A. y Duque, H. (2017). Nutrición de los cafetales en Colombia, en escenarios de la niña. *Avances Técnico, Cenicafé*, 477.

Tesfaye, S.G., Razi, I.M., and Maziah, M. (2008). Effects of deficit irrigation and partial rootzone drying on growth, dry matter partitioning and water use efficiency in young coffee (*Coffea arabica* L.) plants. *Journal of food, agriculture & environment*.

Tesfaye, S.G., Ismail, M.R., Kausar, H., Marziah, M., and Ramlan, M.F. (2013). Plant water relations, crop yield and quality in coffee (*Coffea arabica* L.) as influenced by partial root zone drying and deficit irrigation. *Australian Journal of Crop Science*, 7(9), 1361-1368.

Tounekti, T., Mahdhi, M., Al-Turki, T.A., and Khemira, H. (2018). Water relations and photo-protection mechanisms during drought stress in four coffee (*Coffea arabica*) cultivars from southwestern Saudi Arabia. *South African journal of botany*, 117, 17-25. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2018.04.022>

Turner, N.C. (1996). Further progress in crop water relations. *Advances in agronomy*, 58, 293-338. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60258-8](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60258-8)

Unigarro-Muñoz, C.A., Hernández-Arredondo, J.D., Montoya-Restrepo, E.C., Medina-Rivera, R.D., Ibarra-Ruales, L.N., Carmona-González, C.Y. and Flórez-Ramos, C.P. (2015). Estimation of leaf area in coffee leaves (*Coffea arabica* L.) of the Castillo® variety. *Bragantia*, 74(4), 412-416. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.0026>

Conflictos de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.



Licencia de Creative Commons

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



Fecha de recibido: 26-04-2023
Fecha de aceptado: 14-07-2023
DOI: 10.22490/21456453.6789

CONTROL BIOLÓGICO CONTRA *Fusarium sp.* EN PLANTAS DE UCHUVA (*Physalis peruviana L.*) A NIVEL DE INVERNADERO MEDIANTE APLICACIÓN COMBINADA DE *Trichoderma* SP. Y *Bacillus* SP.

**BIOLOGICAL CONTROL OF *Fusarium* SP. IN CAPE
GOOSEBERRY PLANTS (*Physalis peruviana L.*) AT
GREENHOUSE LEVEL BY COMBINED APPLICATION
OF *Trichoderma* SP. AND *Bacillus* SP.**

Marcela Mora López¹

Ana María Ochoa Aristizábal²

Víctor Manuel Osorio Echeverri³

¹ Profesional en Biotecnología, Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, Medellín, Colombia. marce0384@hotmail.com

² Profesional en Biotecnología, Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, Medellín, Colombia. anamariaochoaaristizabal@gmail.com

³ MSc Biotecnología, Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, Medellín-Colombia. victor.osorio@colm Mayor.edu.co

Citación: Mora, M., Ochoa, A. y Osorio, V. (2024). Control biológico contra *Fusarium* sp. en plantas de uchuva (*Physalis peruviana L.*) a nivel de invernadero mediante aplicación combinada de *Trichoderma* sp. y *Bacillus* sp. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 15(2), 35-67. <https://doi.org/10.22490/21456453.6789>

■ RESUMEN

Contextualización: la producción de la uchuva (*Physalis peruviana* L.), una fruta exótica de gran importancia comercial en Colombia, se ha visto limitada por la presencia de *Fusarium* sp. que causa pérdidas de hasta el 40% de la producción; este patógeno se controla, principalmente, con productos de síntesis química.

Vacío de conocimiento: al uso individual de microorganismos para el control biológico se ha convertido en una estrategia útil para disminuir el impacto causado por *Fusarium* sp.; sin embargo, su actividad se encuentra limitada en campo y por lo tanto es necesario realizar combinaciones en consorcio de diferentes géneros microbianos como herramienta promisoria para el control biológico.

Objetivos: evaluar la actividad antagonista de la aplicación combinada de *Trichoderma* sp. y *Bacillus* sp. como biocontroladores de *Fusarium* sp. a nivel de invernadero en uchuva (*Physalis peruviana* L.)

Metodología: se realizó el aislamiento de microorganismos de muestras de suelo y material vegetal de un cultivo de uchuva. Los aislados consistentes con *Bacillus* sp. y *Trichoderma* sp. fueron enfrentados en condiciones *in vitro* para determinar el porcentaje de inhibición sobre tres aislados de *Fusarium* sp. que mostraron patogenicidad en semillas de uchuva según su

germinación y longitud radicular. La actividad antagonista *in vivo* se probó de manera individual y en consorcio para aquel *Bacillus* sp. y *Trichoderma* sp. que más inhibieron el aislado de *Fusarium* sp. con mayor índice de patogenicidad. Los aislados utilizados en el ensayo *in vivo* fueron identificados por técnicas morfológicas, moleculares y filogenéticas.

Resultados y conclusiones: se obtuvieron siete aislados consistentes con *Bacillus* sp. con actividad inhibitoria contra tres *Fusarium* sp. El aislado bacteriano IB4B (identificado como *Bacillus* sp.) registró el mayor porcentaje de inhibición (48%) y TV1 (*Trichoderma reesei*) fue el hongo con mayor actividad (64%), aunque no difiere estadísticamente de TV2 (identificado como *Trichoderma asperellum*). La prueba de patogenicidad indicó que UCMV21 (identificado como *Fusarium oxysporum*) inhibió la germinación del 58% de las semillas evaluadas. En pruebas *in vivo* en plántulas de uchuva, UCMV21 presentó baja patogenicidad al desarrollar pocos síntomas de marchitez vascular, sin embargo, los tratamientos con el consorcio de *Bacillus* sp. y *Trichoderma* sp., lograron el control del patógeno y mejoraron la longitud radicular de las plántulas.

Palabras clave: biocontrol, biotechnology, inhibition, integrated pest control, phytopathology

ABSTRACT

Contextualization: The production of cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.), an exotic fruit of great commercial importance in Colombia, has been limited by the presence of *Fusarium* sp., which causes losses of up to 40% of production. This pathogen is controlled mainly with chemical synthesis products.

Knowledge gap: The individual use of microorganisms for biological control has become a useful strategy to reduce the impact caused by *Fusarium* sp. However, their activity is limited in the field; therefore, it is necessary to carry out combinations in consortiums of different microbial genera as a promising tool for biological control.

Objectives: To evaluate the antagonistic activity of the combined application of *Trichoderma* sp. and *Bacillus* sp. as biocontrol agents of *Fusarium* sp. at the greenhouse level in cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.).

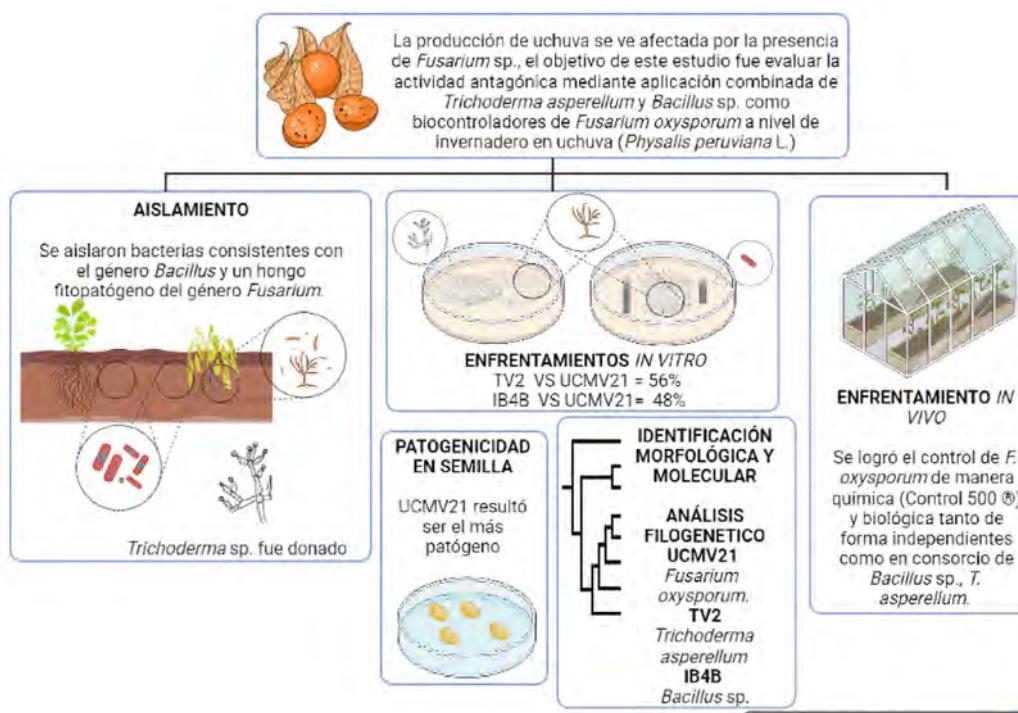
Methodology: Isolation of microorganisms from soil samples and plant material of a cape gooseberry crop was carried out. The isolates consistent with *Bacillus* sp. and *Trichoderma* sp. were tested under in vitro conditions to determine the percentage of inhibition on three isolates of *Fusarium* sp. that showed pathogenicity on cape gooseberry seeds according to

their germination and root length. The *in vivo* antagonistic activity was tested individually and in a consortium for those *Bacillus* sp. and *Trichoderma* sp. that most inhibited the isolate of *Fusarium* sp. with the highest pathogenicity index. The isolates used in the *in vivo* test were identified by morphological, molecular, and phylogenetic techniques.

Results and conclusions: Seven isolates consistent with *Bacillus* sp. with inhibitory activity versus three *Fusarium* sp. were obtained. Bacterial isolate IB4B (identified as *Bacillus* sp.) recorded the highest percentage of inhibition (48%), and TV1 (*Trichoderma reesei*) was the fungus with the highest activity (64%). However, it does not differ statistically from TV2 (identified as *Trichoderma asperellum*). The pathogenicity test indicated that UCMV21 (identified as *Fusarium oxysporum*) inhibited germination of 58% of the seeds evaluated. In *in vivo* tests on cape gooseberry seedlings, UCMV21 showed low pathogenicity as it developed few vascular wilt symptoms; however, treatments with the consortium of *Bacillus* sp. and *Trichoderma* sp. achieved control of the pathogen and improved the root length of the seedlings.

Keywords: biocontrol, biotechnology, inhibition, integrated pest control, phytopathology

■ RESUMEN GRÁFICO



Fuente: autores, creada con BioRender.com

1 INTRODUCCIÓN

La uchuva (*Physalis peruviana* L.) es una planta perteneciente a la familia de las solanáceas, cuenta con la producción de un fruto exótico ampliamente comercializado gracias a su sabor y su alta concentración de fenoles, carbohidratos y carotenoides como el β -caroteno o provitamina A (Corrales-Bernal *et al.*, 2015). Su demanda

ha generado una importante entrada de ingresos para muchos países productores, incluyendo Colombia, Sudáfrica, Kenia, Egipto, Perú y Ecuador (Bazalar *et al.*, 2019). Según el Ministerio de Agricultura en Colombia, en el 2021 se alcanzó la mayor cifra de exportaciones con un valor de US\$37.820.445 y un aumento del

7% de toneladas vendidas con respecto al año anterior (ICA, 2022).

No obstante, diversos desafíos climáticos y fitosanitarios que causan pérdidas de hasta el 80% de la producción total en muchos de los casos, han limitado el cultivo de esta fruta (Fischer *et al.*, 2014; Granados *et al.*, 2019). En la última década, la variación del clima ha perturbado el crecimiento y la producción de este cultivo por el aumento en la temperatura, radiación y precipitaciones; si bien, el cultivo de uchuva no se ve fuertemente afectado por inundaciones severas, las condiciones de alta humedad alteran el ciclo de cultivo y lo exponen a diferentes ataques de enfermedades y plagas. Dentro de las principales afecciones fúngicas que perjudican a las plantaciones de uchuva se encuentran la mancha gris que se expresa sobre las hojas y el cáliz, producida por *Cercospora physalidis* Ellis; la muerte descendente ocasionada por *Phoma* sp. y el marchitamiento vascular por *Fusarium oxysporum*; esta última genera pérdidas del 40% del cultivo y es la más limitante y de mayor impacto económico (Diaz, *et al.*, 2012; Mayorga-Cubillos *et al.*, 2019). Se ha demostrado que *F. oxysporum* entra a la planta por el sistema radicular, obstruye y degrada los haces vasculares en los tallos, genera una coloración marrón en estos y ocasiona clorosis, pérdida de turgencia, baja producción de frutos y finalmente el perecimiento de la planta (de Lamo y Takken, 2020; Hudson *et al.*, 2021). Sin embargo, *F. oxysporum* no es la única especie del género que ataca el cultivo; *F. fujikuroi*, *F. culmorum*, *F. graminearum*, *F. poae*, *F. ave-*

naceum, *F. sporotrichioides* y *F. verticillioides*, también pueden llegar a afectar a la uchuva y otros cultivos aledaños (Bakker *et al.*, 2018; Podgórska-Kryszczuk *et al.*, 2022; Toloza-Moreno *et al.*, 2020).

Para el control de estas enfermedades fúngicas se han propuesto estrategias según los mecanismos de infección y los síntomas causados, como el tratamiento con vapor y solarización del suelo (Dwivedi y Dwivedi, 2020) y el control químico con fungicidas como Captan, Tiram, Carbendazim, Clorotalonil, Mancozeb, Metil tiocianato, Tebuconazol, Propiconazol y Difenconazol (Jamil y Ashraf, 2020; Kumari *et al.*, 2020). Sin embargo, muchos de estos fungicidas comerciales son poco efectivos, principalmente, por el desarrollo en estos patógenos de diferentes mecanismos de resistencia a ciertos compuestos, lo cual obliga al agricultor a usar dosis más elevadas o productos con categoría toxicológica más alta, lo cual aumenta los costos de producción y ocasiona un mayor impacto ambiental (Hu y Chen, 2021; Hudson *et al.*, 2021).

Esta situación ha impulsado la exploración de nuevas opciones de control biológico más eficientes y sostenibles aplicables en el manejo integral del marchitamiento vascular inducido por *Fusarium* sp. Muchos hongos y bacterias han mostrado un potencial para inhibir el crecimiento de organismos fitopatógenos y mitigar la infección causada por estos en cultivos vegetales, ya sea a través de antibiosis o por diversos mecanismos como el microparasitismo, lisis enzimática y competen-

cia por espacio o nutrientes. De hecho, algunas bacterias de los géneros *Bacillus* y *Pseudomonas* y hongos como *Trichoderma* sp. han mostrado un potencial para el control biológico de *Fusarium* sp. en cultivos como el de uchuva (Agarwal *et al.*, 2017; Anusha *et al.*, 2019; Islam *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2018; Tsegaye *et al.*, 2018).

La capacidad antagónica exitosa de algunas especies del género *Trichoderma* se atribuye al micoparasitismo, la excreción de enzimas líticas que causan cambios estructurales a nivel celular en el patógeno, la competencia por espacio y nutrientes, la inhibición de las enzimas producidas por el patógeno para infectar la planta y la antibiosis debida a la producción de metabolitos secundarios volátiles y no volátiles que inhiben el crecimiento de otros hongos (Infante *et al.*, 2009; Mukhopadhyay y Kumar, 2020).

Por su parte, las bacterias aerobias formadoras de endosporas del género *Bacillus* con propiedades biocontroladoras, comúnmente son usadas como fungicida e insecticida debido a su interacción con las plantas en las que estimula una resistencia sistémica asociada a cambios fisiológicos y bioquímicos como la producción de fitoalexinas; esto potencia los

sistemas de defensa de las plantas cuando aquellas se encuentran expuestas a un factor de estrés como organismos patógenos. Además, las bacterias compiten en la rizosfera por espacio y nutrientes con los organismos fitopatógenos, lo que lleva a una limitación en el crecimiento de estos hongos en el suelo (Choudhary *et al.*, 2007; Fira *et al.*, 2018).

Aunque se ha demostrado el beneficio de diferentes tratamientos en condiciones *in vitro* y en campo con un único microorganismo como controlador de hongos patógenos, hay diversos factores en cada agroecosistema que influyen sobre la efectividad de estos (Parikh *et al.*, 2018). Una combinación en consorcio de diferentes géneros microbianos con actividad antifúngica permitiría la formulación de productos más versátiles y que se adapten mejor a las diferentes condiciones de cultivo, manteniendo el potencial biocontrolador (Raupach y Kloepper, 1998). Por tal motivo, en este trabajo se evaluó la actividad antagónica mediante aplicación combinada de *Trichoderma* sp. y *Bacillus* sp. como biocontroladores de *Fusarium* sp. a nivel de invernadero en uchuva (*Physalis peruviana* L.) con el fin de proponer estrategias adicionales en el control de enfermedades fúngicas de los cultivos de esta fruta.

MATERIALES Y MÉTODOS 2

Aislamiento de microorganismos

Se recolectaron 200 g de suelos de la rizosfera en dos cultivos de uchuva (*Physalis peruviana* L), uno de la vereda Pantalio del municipio de La Unión, Antioquia (5°58'52.68"N 75°24'37.08"W) y otro sobre la vía La Unión, Sonsón (5°57'32.4"N 75°19'48"W). Las muestras se obtuvieron a una profundidad entre 0 y 20 cm cerca de las raíces, tanto de plantas de uchuva sanas como de plantas con signos de infección por *Fusarium* sp., evidenciada por presencia de hojas amarillas y marchitas, tallos flácidos y caídos, necrosis leve y poco desarrollo foliar. Todas las muestras se transportaron refrigeradas en bolsas de polietileno. Se realizaron diluciones seriadas a partir de una suspensión preparada agitando 50 g de suelo en 50 ml de agua destilada durante 30 min. Las diluciones entre 10⁻³ y 10⁻⁸ se sembraron por triplicado en Agar Triptona Soya (TSA) y en Agar Papa Dextrosa (PDA) para el aislamiento de bacterias y hongos, respectivamente.

Se recolectaron además cinco muestras de material vegetal como hojas y tallos con los síntomas de infección por *Fusarium* sp. mencionados, las cuales fueron desinfectadas con hipoclorito de sodio al 2% v/v durante 1 min y lavados con agua destilada estéril; se cortaron en fragmen-

tos de 0.5 cm y tres de cada tejido se incubó sobre Agar Rosa de Bengala (polipeptona micológica 5.0 g/L, glucosa 10 g/L, sulfato de magnesio 0.50 g/L, fosfato potásico 1 g/L, rosa de Bengala 0.06 g/L, cloranfenicol 0.20 g/L y agar-agar 15 g/L a pH 7) para el aislamiento de *Fusarium* sp. a partir del material vegetal.

Todos los medios (TSA, PDA y Rosa de bengala) se incubaron a temperatura ambiente durante 2 días para el aislamiento de bacterias y 8 días para la obtención de *Fusarium* sp. Los aislamientos TV1 (*T. reesei*) y TV2 (*Trichoderma* sp.) utilizados en este estudio fueron donados por la I.U. Colegio Mayor de Antioquia.

Se comprobaron los rasgos morfológicos de los hongos mediante observaciones microscópicas con azul de lactofenol aplicando claves taxonómicas para su identificación preliminar (Barnett y Hunter, 1998). Se confirmó el aislamiento de bacterias formadoras de endosporas por tinción de Gram y con verde de malaquita.

Antagonismo in vitro

Para evaluar la actividad inhibitoria de *Trichoderma* sp. sobre *Fusarium* sp. se realizaron enfrentamientos duales por triplicado en PDA, para esto se ubicaron discos de 0.5 cm de diámetro con micelio de am-

bos hongos a una distancia entre sí de 7 cm. Los hongos provenían de cultivos de 7 días de incubación a temperatura ambiente en PDA. Estos ensayos se incubaron a 28 °C durante 7 días.

Los enfrentamientos duales entre *Bacillus* sp. y *Fusarium* sp. se realizaron por triplicado en PDA; se ubicó un disco con el hongo en el centro de la caja y se inocularon cuatro aislados bacterianos en estrías, cada una a 3 cm del hongo. En este caso, las bacterias provenían de un cultivo en agar Infusión Cerebro Corazón (BHI) con 24 horas de crecimiento a 37 °C, dichos ensayos se incubaron a 28 °C durante 7 días.

Se midió el crecimiento de las colonias y se determinó la capacidad de los aislados mediante el porcentaje de inhibición del crecimiento micelial (%I) del patógeno, siguiendo el modelo matemático utilizado por Gautam *et al.* (2015) (Ecuación 1), en el que %I es el porcentaje de inhibición micelial, T el diámetro con crecimiento micelial influenciado y C el diámetro con crecimiento micelial libre.

$$\%I = \frac{C - T}{C} \times 100 \quad (\text{Ecuación 1})$$

Prueba de patogenicidad

Se desinfectaron semillas comerciales de uchuva (Fercon®) en hipoclorito de sodio al 2% v/v durante 5 minutos y se lavaron tres veces con agua destilada estéril; se ubicaron 15 semillas por tratamiento, cin-

co por caja de Petri con papel filtro, a una humedad relativa del 95% y se inocularon con 5 ml de una suspensión de 1×10^6 conidios/ml ajustado en cámara de Neubauer, con cada uno de los hongos patógenos a evaluar. Las semillas se incubaron durante 15 días a temperatura ambiente y fotoperíodo 12 horas luz / 12 horas oscuridad. Se determinó la presencia de micosis sobre la semilla o radícula usando el porcentaje de germinación (%G) bajo el modelo matemático de Gautam *et al.* (2015) (Ecuación 2), además se midió con una regla graduada la longitud radicular de las plántulas para cada tratamiento.

$$\%G = \frac{\text{Número de semillas germinadas}}{\text{Número total de semillas}} \times 100$$

(Ecuación 2)

Actividad antagónica en condiciones de invernadero

Se sembraron plántulas de uchuva (Fercon®) de menos de tres meses de edad y obtenidas sin aplicación de agroquímicos, en bandejas con turba y cascarilla de arroz estéril mezcladas en proporción 50:50. Las plantas durante todo el ensayo se mantuvieron bajo condiciones de invernadero con luz natural, un fotoperíodo 12 horas luz / 12 horas oscuridad, temperatura promedio de 25°C, un riego cada tres días con agua destilada estéril y por planta se adicionó una solución de Hoagland cada 15 días preparada de acuerdo a Realpe Ortiz *et al.* (2006). Para esta prueba se seleccionó el hongo que causó la mayor

reducción en la germinación y como biocontroladores se evaluaron un aislado de *Bacillus* sp. y uno de *Trichoderma* sp. con inhibiciones *in vitro* superiores al 45%.

Se aplicaron nueve tratamientos a las plantas como se muestra en la Tabla 1, para cada uno se contaba con cinco unidades experimentales ubicadas de forma aleatoria en cada bandeja y la inoculación del patógeno se realizó cinco días después de adicionar los biocontroladores. El proceso de inoculación se realizó con 1×10^6 conidios/ml del hongo patógeno y/o 1×10^8 conidios/ml o UFC/ml de los

biocontroladores según cada tratamiento. La concentración se ajustó en cámara de Neubauer para los conidios fúngicos, con un patrón McFarland 0.5 para las células bacterianas.

Tres meses después de iniciar la inoculación, se determinó la longitud, el peso fresco y seco del área foliar (tallos), radicular (raíz) y de la plántula y el número de hojas; adicionalmente, se realizó un reaislamiento de los microorganismos en PDA y agar nutritivo con el fin de verificar la presencia de los microrganismos inoculados en cada tratamiento.

■ **Tabla 1.** Tratamientos aplicados para la evaluación de la actividad antagónica en condiciones de invernadero de *Bacillus* sp., *Trichoderma* sp. y su actividad conjunta frente a *Fusarium* sp.

Tratamientos aplicados	Descripción
1) Control negativo	Plántulas sin infectar con adición de agua destilada
2) Control químico	Plántulas infectadas con <i>Fusarium</i> sp., tratadas con fungicida químico comercial Control 500® de acuerdo con las especificaciones de la etiqueta
3) Control de infección	Plántulas infectadas con <i>Fusarium</i> sp. adición de agua destilada
4) Tratamiento <i>Bacillus</i> sp.	Plántulas no infectadas, tratadas con bacteria controladora (<i>Bacillus</i> sp.)
5) Tratamiento <i>Trichoderma</i> sp.	Plántulas no infectadas, tratadas con hongo controlador (<i>Trichoderma</i> sp.)
6) Tratamiento en consorcio.	Plántulas no infectadas, tratadas con el consorcio bacteria hongo (<i>Bacillus</i> sp. y <i>Trichoderma</i> sp.).
7) Tratamiento <i>Fusarium</i> sp. y <i>Bacillus</i> sp.	Plántulas infectadas con <i>Fusarium</i> sp., tratadas con bacteria controladora (<i>Bacillus</i> sp.)
8) Tratamiento <i>Fusarium</i> sp. y <i>Trichoderma</i> sp.	Plántulas infectadas con <i>Fusarium</i> sp., tratadas con hongo controlador (<i>Trichoderma</i> sp.)
9) Tratamiento <i>Fusarium</i> sp. y consorcio.	Plántulas infectadas con <i>Fusarium</i> sp., tratadas con el consorcio bacteria – hongo (<i>Bacillus</i> sp. y <i>Trichoderma</i> sp.).

Fuente: autores.

Extracción del DNA y amplificación de la región ITS

Se realizó la identificación molecular del hongo con mayor índice de patogenicidad. Para esto se cultivaron los hongos en caldo Sabouraud a temperatura ambiente durante 5 días; el micelio obtenido se maceró en nitrógeno líquido y se adicionaron 700 μ l de buffer CTAB 2X a 65 °C y cuatro μ l de β -mercaptoetanol. Despues de incubar a 65 °C durante 45 min se adicionaron 700 μ l de cloroformo-alcohol isoamílico 24:1 y se recuperó el sobrenadante después de centrifugar a 12000 rpm por 20 min. Se agregaron 700 μ l de cloroformo y después de centrifugar se adicionó un volumen de isopropanol incubando a -20 °C durante 1 hora. Luego de centrifugar nuevamente, se realizaron varios lavados del pellet con etanol y finalmente se resuspendió en 50 μ l de agua ultrapura estéril (Calle, 2017). La amplificación de la región Internal Transcribed Spacer (ITS, por sus siglas en inglés) se realizó por PCR con los cebadores ITS1 e ITS4 (White *et al.*, 1990). La reacción se realizó en un volumen de 30 μ l que contenía buffer 1X, 1.5 mM de MgCl₂, 0.2 mM de dNTPs, 0.2 μ M de cada cebador, 50-100 ng/ μ l de ADN blanco y una U de Taq polimerasa, con 30 ciclos de un min a 94 °C, un min a 50 °C y un min a 72 °C, seguidos por otra incubación a 72 °C por cinco min.

Por otro lado, para la identificación del aislado bacteriano con mayor actividad antagonista, se extrajo ADN a partir de un cultivo en caldo BHI utilizando el kit Wizard® Genomic DNA Purification (Prome-

ga Corporation, Wisconsin, USA) según las instrucciones del fabricante. La amplificación por PCR del gen ARNr 16S se realizó con los cebadores universales 27f y 1492r (Heuer *et al.*, 1997). La reacción se realizó en 50 μ l consistente en buffer 1X, 2 mM de MgCl₂, 0.2 mM de dNTPs, ocho μ M de cada cebador, 50-100 ng/ μ l de ADN blanco y 1.25 U de Taq polimerasa, con 30 ciclos de 1 min a 94 °C, un min a 52 °C y un min a 72 °C, seguidos por otra incubación a 72 °C por cinco min (Lane, 1991).

La cuantificación y calidad del ADN se realizó en Nanodrop 2000 (Thermo Fisher Scientific, Wilmington, DE) y la integridad del ADN, así como la presencia de productos de PCR, se confirmaron en gel de agarosa 1.5% con EZ-Vision® In-Gel Solution 10000X (VWR) y visualización en luz ultravioleta. Estos últimos se purificaron usando el kit Wizard® SV Gel and PCR Clean-Up (Promega) y se secuenciaron utilizando los respectivos cebadores, esto se realizó en un ABI-3500 automatizado utilizando el kit BigDye™ Terminator Cycle Sequencing (Applied Biosystems), de acuerdo con las instrucciones del fabricante.

Identificación y análisis filogenético

Inicialmente, se verificó la calidad y nitidez de todos los electroferogramas, a partir de secuencias Forward y Reverse, seguidamente, las secuencias fueron alineadas y cortadas utilizando el software Geneious v10.0.9 (Kearse *et al.*, 2012). Luego, las secuencias se sometieron a

una búsqueda BLAST (Altschul *et al.*, 1990) para verificación y comparación con las disponibles en GenBank (Madden *et al.*, 1996) y finalmente todas las secuencias congénères que tenían más del 96% de identidad se descargaron e incluyeron en el conjunto de datos final para delimitación de especies. Como grupo externo se utilizaron las especies *Escherichia coli* y *Aspergillus niger* de GenBank. Para ello, se realizó una inferencia filogenética bayesiana utilizando BEAST 1.8.2 (Drummond *et al.*, 2012) bajo un reloj estricto bayesiano, con un modelo de evolución molecular HKY+I para aislado bacteriano, HKY para el hongo con mayor índice de patogenicidad y el hongo controlador con mayor actividad antagonista obtenido por jModel test v2 (Darriba *et al.*, 2012), con modelo de especiación Birth Death. Los análisis se realizaron con 100 millones de generaciones según el método de Monte Carlo basado en cadenas de Markov (MCMC), iniciado con un árbol aleatorio. Los árboles y las estimaciones de tiempo se tomaron cada 50000 generaciones, para un total de 5000 de árboles, los demás parámetros fueron analizados siguiendo la configuración predeterminada construido en el complemento BEAUTi de la misma versión. Después, se verificó la convergencia del corrido en TRACER (Rambaut *et al.*, 2018). A través de los valores de los tamaños de muestra efectivos (ESS) >200 de cada parámetro. Se utilizó TreeAnnotator (Drummond y Rambaut, 2007) para descartar el 10% de las lecturas (*burn in*) y crear un árbol ultramétrico de clado máximo con probabilidades posteriores de nodos, tiempos de

divergencia promedio, e intervalos de credibilidad del 95.

Después, se llevó a cabo una delimitación de especies de locus único (SLSD) en R 3.4.1 (R Development Core Team, 2014), siguiendo los modelos locmin, gmvc, y bgmvc, según lo propuesto por Machado *et al.* (2018). El enfoque de optimización del umbral de distancia y agrupación calculado por locmin, se realizó con el paquete spider_1.5.0 (Brown *et al.*, 2012); por otro lado, los análisis gmvc y bgmvc se desarrollaron en dos fases, la primera consta de una estimación puntual apoyada del árbol de máxima credibilidad antes formado en TreeAnnotator y la segunda a partir de intervalos de confianza determinados a partir de la probabilidad posterior de 1000 árboles, todo calculado mediante los paquetes bgmvc_1.0.2 (Reid y Carstens, 2012), splits_1.0-19 (Fujisawa y Barraclough, 2013), y ape_5.4 (Paradis, Claude y Strimmer, 2004). Por último, los resultados se visualizaron utilizando el paquete ggtree 3.0.1 (Yu *et al.*, 2017).

Análisis estadístico

Para analizar la actividad antagonista según el porcentaje de inhibición causado por las bacterias, se implementó un diseño completamente aleatorio (DCA) con tres réplicas, y se aplicaron una prueba no paramétrica (Kruskal-Wallis) y una comparación entre parejas para determinar las diferencias significativas ($\alpha = 0.05$) entre los aislados. De igual forma, a fin de analizar la inhibición causada por *Tricho-*

derma sp., se realizó un DCA y se aplicó una prueba de t-student con el propósito de identificar diferencias en los porcentajes de inhibición. Para determinar los efectos de los tratamientos en condiciones de invernadero sobre las variables germinación de semillas, número de hojas, peso fresco, peso seco, longitud foliar y longi-

tud radicular se implementó un análisis de varianza de una vía y una prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$) para comparación múltiple de medias, utilizando el software estadístico IBM SPSS 25®. Previamente, se confirmó la normalidad con la Prueba de Shapiro Wilk e independencia de varianzas con la prueba de Levene.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Aislamiento de microorganismos

Se aislaron 21 bacterias con morfología microscópica bacilar sin agrupación, Gram positivos, esporulados, con características consistentes con el género *Bacillus* (Zeigler y Perkins, 2021). De las muestras obtenidas de las rizosferas del cultivo de uchuva ubicado en la vereda

Pantilio, tanto de suelos de plantas sanas como de plantas sintomáticas, se logró el aislamiento de bacterias del género *Bacillus* spp., dicho comportamiento no se evidenció para las muestras colectadas en la vía La Unión, Sonsón, ya que, para este caso, solo fue posible aislar microorganismos de este género a partir de la rizosfera con plantas sanas (Tabla 2).

■ **Tabla 2.** Codificación de los aislados consistentes con *Bacillus* sp. obtenidos a partir de la rizosfera de plantas de uchuva sanas y sintomáticas

Plantas	Vereda Pantilio	Vía La Unión - Sonsón
Sanas	S1, S3, S4	UC151, UC152, UC252, UC352, UC353, UC452, UC453, UC455, UC261
Con marchitez vascular	IA1, IA2, IA3, IB1, IB3, IB4A, IB4B, IB4C, IB5	NR

NR: no recuperados. Fuente: autores.

De acuerdo con la literatura, la diversidad bacteriana suele ser significativamente mayor en las plantas sanas que en las afectadas por fitopatógenos (Zhou *et al.*, 2021), lo que estaría de acuerdo con este estudio para las muestras colectadas en la vía La Unión, Sonsón. No obstante, no siempre ocurre de la misma manera. Jamil *et al.* (2022) y Liu *et al.* (2014), indicaron que un suelo saludable no siempre está asociado con una alta diversidad bacteriana; sin embargo, la presencia de *Fusarium* spp. en la rizosfera induce un aumento en los exudados de las plantas lo que le permite establecer interacciones con los pocos o muchos microorganismos controladores presentes en el suelo y activar sus mecanismos de acción.

En este estudio, a partir de las diferentes muestras del material vegetal colectado se obtuvieron tres aislados de *Fusarium* sp., dos del cultivo ubicado en **vía La Unión**, Sonsón (UCMV12, UCMV21) y uno de Vereda Pantalio (FVP22). Estos aislados en PDA presentaron micelio veloso de color blanco y con coloración púrpura en el reverso de la caja después de una semana de incubación y macroconidios en forma de medialuna, hialinas y septadas que según diferentes claves taxonómicas permiten confirmar el género de estos hongos (Barnett y Hunter, 1998; Rentería-Martínez *et al.*, 2018). Al igual que en este trabajo, algunos estudios han demostrado que los hongos del género *Fusarium*, especialmente *F. oxysporum*, presentan la mayor incidencia en plantas sanas o sin síntomas de marchitez en cultivos de uchuva de otras regiones del país, además se reportan coleccio-

nes que reúnen más de 136 aislamientos de esta especie (Simbaqueba *et al.* 2021; Toloza-Moreno *et al.*, 2020).

Antagonismo *in vitro*

Se confirmó que diferentes aislados del género *Bacillus* inhiben el crecimiento de *Fusarium* sp. Donde siete de estos (33.33%) presentaron actividad antagónica contra los tres aislados FVP22, UCMV12 y UCMV21. El patógeno que mostró mayor susceptibilidad y que fue inhibido por el 90% de los aislados bacterianos fue FVP22, con los mayores porcentajes de inhibición causados por IB4B y UC453 con valores de 29.82 ± 4.34 y 30.53 ± 5.49 % respectivamente (Tabla 3). Por otro lado, UCMV21 fue el hongo inhibido por menos aislados bacterianos, aunque los máximos porcentajes de inhibición en este estudio se alcanzaron contra este hongo por parte de los aislados IB4A y IB4B (48.42 ± 1.82 %).

Los resultados demuestran que el aislado bacteriano con mayores porcentajes de inhibición fue IB4B coinciden con lo reportado por Vega-Torres *et al.* (2019), quienes alcanzaron inhibiciones *in vitro* de *Fusarium oxysporum* con *Bacillus* sp. entre 26 y 56 %, aunque fueron menores del 78% obtenido por Win *et al.* (2021), para uno de sus aislados de *Bacillus* sp. Según Constanza *et al.* (2011), IB4B sería un aislado como antagonismo medio (mostrando inhibición entre el 40 y 50 %) lo que indica que su actividad podría potenciarse con la inoculación simultánea de otros controladores a pesar de que este género bacteria-

no pueda presentar uno o más de los principales mecanismos de acción que evitan el establecimiento y desarrollo de organismo

mos fitopatógenos, como la excreción de antibióticos, sideróforos, enzimas líticas y toxinas (Villarreal-Delgado *et al.*, 2018).

■ Tabla 3. Inhibición de aislados consistentes con *Fusarium* sp. por antagonismo dual con aislados bacterianos del género *Bacillus*

Aislado	% Inhibición		
	UCMV12	UCMV21	FVP22
IA1	0 ± 0.0 ^b	0 ± 0.0 ^b	2.01 ± 3.47 ^c
IA2	0 ± 0.0 ^b	0 ± 0.0 ^b	9.02 ± 8.67 ^{bc}
IA3	0 ± 0.0 ^b	0 ± 0.0 ^b	7.77 ± 8.78 ^{bc}
IB1	4.23 ± 1.95 ^b	16.84 ± 1.82 ^a	13.53 ± 6.51 ^{bc}
IB3	0 ± 0.0 ^b	0 ± 0.0 ^b	6.02 ± 6.51 ^{bc}
IB4A	24.51 ± 7.04 ^a	48.42 ± 1.82 ^a	26.07 ± 2.17 ^a
IB4B	23.38 ± 5.16 ^a	48.42 ± 1.82 ^a	29.82 ± 4.34 ^a
IB4C	0 ± 0.0 ^b	0 ± 0.0 ^b	26.07 ± 5.74 ^a
IB5	0 ± 0.0 ^b	0 ± 0.0 ^b	0 ± 0.0 ^c
S1	0 ± 0.0 ^b	0 ± 0.0 ^b	1.504 ± 1.3 ^c
S3	0 ± 0.0 ^b	0 ± 0.0 ^b	0 ± 0.0 ^c
S4	16.62 ± 5.16 ^a	0 ± 0.0 ^b	9.77 ± 6.51 ^{bc}
UC151	15.38 ± 7.05 ^a	14.18 ± 0.0 ^a	28.14 ± 3.59 ^a
UC152	0 ± 0.0 ^b	2.68 ± 4.65 ^b	23.14 ± 6.05 ^b
UC252	0 ± 0.0 ^b	0 ± 0.0 ^b	18.56 ± 2.07 ^{bc}
UC352	23.08 ± 9.61 ^a	44.83 ± 1.62 ^a	26.95 ± 5.49 ^a
UC353	0 ± 0.0 ^b	0 ± 0.0 ^b	21.98 ± 4.03 ^b
UC452	0 ± 0.0 ^b	0 ± 0.0 ^b	28.14 ± 3.59 ^a
UC453	10.77 ± 2.66 ^a	0 ± 0.0 ^b	30.54 ± 5.49 ^a
UC455	25.80 ± 8.04 ^a	3.32 ± 4.20 ^b	14.99 ± 8.07 ^{bc}
UC261	3.07 ± 0.0 ^b	30.52 ± 3.54 ^a	11.38 ± 2.07 ^{bc}

En todos los casos los valores se expresan como el promedio ± desviación estándar. Los valores indicados con distinta letra para cada hongo patógeno difieren estadísticamente ($p<0.05$).

Fuente: autores.

Por otra parte, no se encontraron diferencias significativas entre los porcentajes de inhibición presentados por los hongos TV1 y TV2 para cada hongo patógeno; sin embargo, la máxima inhibición fue contra UCMV12 ($64.38 \pm 10.34\%$) y la menor contra UCMV21 ($56.54 \pm 4.53\%$) (Tabla 4). Estos resultados son similares a los reportados por Tsegaye Redda *et al.* (2018) quienes alcanzaron un rango de inhibición de *Fusarium oxysporum* del 29.72 ± 3.47 al 68.76% con 20 cepas diferentes del género

Trichoderma y a los presentados por Al-ani y Albaayit (2018), los cuales alcanzaron porcentajes de inhibición superiores al 50% contra *F. oxysporum* raza 4. Muchas especies del género *Trichoderma* han sido ampliamente reportadas por su capacidad de producir compuestos antifúngicos que afectan indirectamente al crecimiento de los hongos patógenos, inducidos probablemente por la quitina de la pared celular de estos (Al-ani y Albaayit, 2018).

■ **Tabla 4.** Porcentaje de inhibición de los hongos consistentes con *Fusarium* sp. al enfrentarse con los aislados de *Trichoderma* sp.

Aislado	% Inhibición		
	UCMV12	UCMV21	FVP22
TV1	64.38 ± 10.34^a	43.70 ± 15.67^a	60.34 ± 5.97^a
TV2	58.22 ± 4.27^a	56.54 ± 4.53^a	63.22 ± 2.63^a

En todos los casos los valores se expresan como el promedio \pm desviación estándar. Los valores indicados con distinta letra para cada hongo patógeno difieren estadísticamente ($p<0.05$).

Fuente: autores.

Prueba de patogenicidad

Después de inocular las semillas de uchuva con los tres hongos patógenos evaluados (UCMV12, UCMV21 y FVP22) e incubarlas durante 15 días, se observó una disminución en el porcentaje de germinación y en la longitud radicular como resultado de la infección (Tabla 5). El aislado UCMV21 redujo la germinación de las semillas en un 58% y las raíces obtenidas en este tratamiento fueron las más cortas (0.4 cm), en comparación con el control

negativo (3.3 cm) (Figura 1). En todos los tratamientos excepto el control, se observó un micelio aéreo esponjoso y blanco sobre la superficie de la raíz (Figura 2). La patogenicidad de diferentes especies de *Fusarium* en semillas ya ha sido reportada, algunas cepas de *F. asiaticum* y *F. fujikuroi*, por ejemplo, causaron daños en semillas de soja evidenciados por la disminución del peso fresco y de la germinación de las semillas en casi 90% (Chang *et al.*, 2020), siendo estos aislamientos mucho más patógenos que los analizados en el presente

estudio. No obstante, en otro trabajo se encontraron reducciones del 40-66% en la germinación de semillas de sésamo al inocularlas con *F. proliferatum* y reducciones del 16.5% en el vigor (Nayyar *et al.*, 2018), resultados más similares a los obtenidos en este estudio para el aislado UCMV21.

Las diferencias encontradas en la patogenicidad de los tres aislamientos de *Fusa-*

rium como patógeno hemibiotrófico, pueden deberse a los mecanismos de virulencia expresados de manera diferencial por cada uno y que incluyen la producción de enzimas que degradan la pared celular y la síntesis de micotoxinas, que les permite esquivar las vías de defensa de las plantas, evitar el desarrollo vegetal y causar la muerte de las células (Perincherry *et al.*, 2019).

Tabla 5. Porcentaje de germinación y longitud radicular de semillas de uchuva como evaluación de patogenicidad de cada *Fusarium* sp. aislado

Aislado	% Germinación	Longitud de la raíz (cm)
UCMV12	$80.00 \pm 1.33^{\text{a}}$	$0.93 \pm 0.15^{\text{c}}$
UCMV21	$42.22 \pm 0.10^{\text{b}}$	$0.40 \pm 0.09^{\text{d}}$
FVP22	$86.67 \pm 0.06^{\text{a}}$	$1.43 \pm 0.10^{\text{b}}$
Control	$100 \pm 0.0^{\text{a}}$	$3.27 \pm 0.15^{\text{ab}}$

En todos los casos los valores se expresan como el promedio \pm desviación estándar. Los valores indicados con distinta letra para cada hongo patógeno difieren estadísticamente ($p<0,05$).

Fuente: autores.



Figura 1. Longitud de la raíz por tratamiento. **A)** Control negativo (3.27 ± 0.15 cm) **B)** FVP22 (1.43 ± 0.1 cm). **C)** UCMV21 (0.4 ± 0.09). **D)** UCMV12 (0.93 ± 0.15 cm)

Fuente: autores.



Figura 2. Observación por estereomicroscopio del crecimiento del hongo por tratamiento. A) FVP22 B) UCMV21 C) UCMV12. Para todos los casos, se observó un crecimiento micelial de los patógenos sobre la raíz emergente de la semilla

Fuente: autores.

Antagonismo en invernadero

De acuerdo con la escala de virulencia de Correll *et al.* (1986) en función de la gravedad de la enfermedad, el patógeno UCMV21 inoculado en plántulas de uchuva, se puede categorizar en nivel dos, siendo poco virulento y agresivo, ya que, luego de tres meses de estudio, las plántulas inoculadas únicamente con el patógeno (Control patógeno) desarrollaron pocos síntomas de marchitez vascular, presentándose una muy leve coloración púrpura en la raíz, una sutil decoloración de las hojas y un crecimiento deficiente identificado por las dimensiones más bajas según las pruebas biométricas de longitud para la raíz (5.8 cm), el tallo (19.6 cm) y la plántula (raíz + tallo = 25.4 cm) (Figura 3).

Esta baja patogenicidad y virulencia es opuesta a los esperado, ya que en la prue-

ba de patogenicidad en semilla se registró una disminución en la germinación, resultado que podría explicarse, dado que los hongos del género *Fusarium* pueden presentar mayor o menor agresividad, dependiendo del estadio de desarrollo de la planta (Chang *et al.*, 2020), lo que, para este estudio, indicaría que UCMV21 presenta una mayor incidencia de la enfermedad en estados de desarrollo prematuro de las plantas, limitando la germinación como se observó en la prueba de patogenicidad. A pesar de esto, las plántulas de los demás tratamientos permanecieron asintomáticas e indicaron que todos los tratamientos evaluados presentaron actividad biocontroladora frente a este aislado. El tratamiento combinado demostró ser el mejor en la variable longitud de raíz, con un valor de 30.6 cm, sin embargo, este no destacó en la longitud del tallo; posi-

blemente la combinación de ambos microorganismos genera la producción de fitohormonas que inducen la elongación de la raíz y retrasa el crecimiento del tallo

(Alcántara *et al.*, 2019). Los demás tratamientos no difieren estadísticamente entre sí con un $p < 0.05$ (Figura 3).

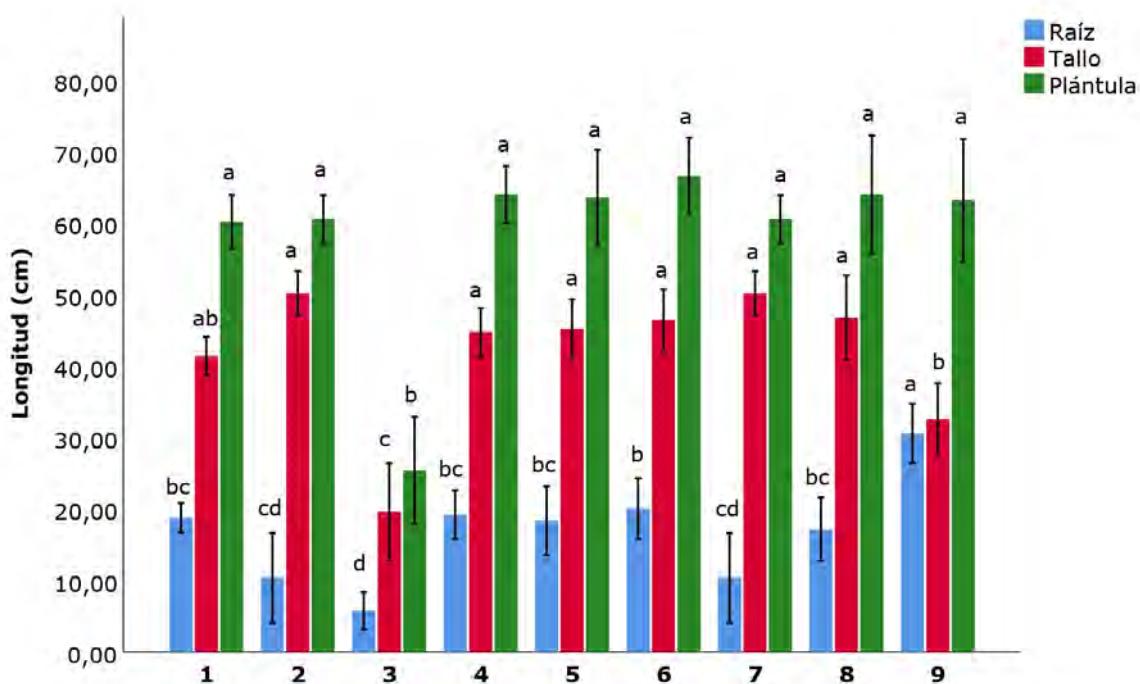


Figura 3. Longitud de la raíz, tallo y plántula por tratamiento. Los valores indicados con distinta letra difieren estadísticamente ($p < 0.05$). Cada variable respuesta fue analizada de manera independiente con respecto a los tratamientos 1 al 9 descritos y nombrados en la Tabla 1

Fuente: autores.

Para la variable de peso fresco de la raíz, solo el tratamiento con el patógeno (Control de infección) y el tratamiento con agua (Control negativo) presentaron diferencias significativas con valores de 0.14 y 1.46 gramos respectivamente (Figura 4). En el peso fresco del tallo y de la plántula, el control con el patógeno presentó los valores más bajos y difiere estadísticamente

con los demás tratamientos, los cuales no difieren entre sí, demostrando la disminución del crecimiento y desarrollo de la planta a causa del patógeno presente; entre tanto, en peso seco y número de hojas (cuyo conteo oscilo de 8 a 11 para todos los casos), ningún tratamiento presentó diferencias significativas, lo que indica que los tratamientos no influyen en la biomasa de

las plántulas sino en la longitud de estas, especialmente en la raíz (Figura 5).

Los biocontroladores, tanto de forma individual como en consorcio microbiano a la concentración inoculada, no mostraron efectos negativos sobre los parámetros biométricos medidos demostrando ser microorganismos benéficos lo que concuerda con lo reportado con Chaves-Gómez *et al.* (2021) y Zaim *et al.* (2018), quienes al aplicar aislados del género *Bacillus* sp. y *Trichoderma* sp. obtuvieron buenos resultados, tanto en control biológico como para el desarrollo de las plántulas de uchuva y garbanzo respectivamente.

Aunque el tratamiento control con el patógeno en plantas no mostró todos los síntomas asociados al marchitamiento vascular, sí se evidenció la colonización de los haces vasculares, con lo que fue posible reaislar los microorganismos inoculados de los tratamientos según correspondía. Es importante resaltar que para los tratamientos con *Fusarium* sp. y los biocontroladores se obtuvieron menos UFC del patógeno, en comparación con el tratamiento inoculado solo con el patógeno, demostrando que los microorganismos benéficos prevalecieron y proliferaron en el suelo durante todo el estudio.

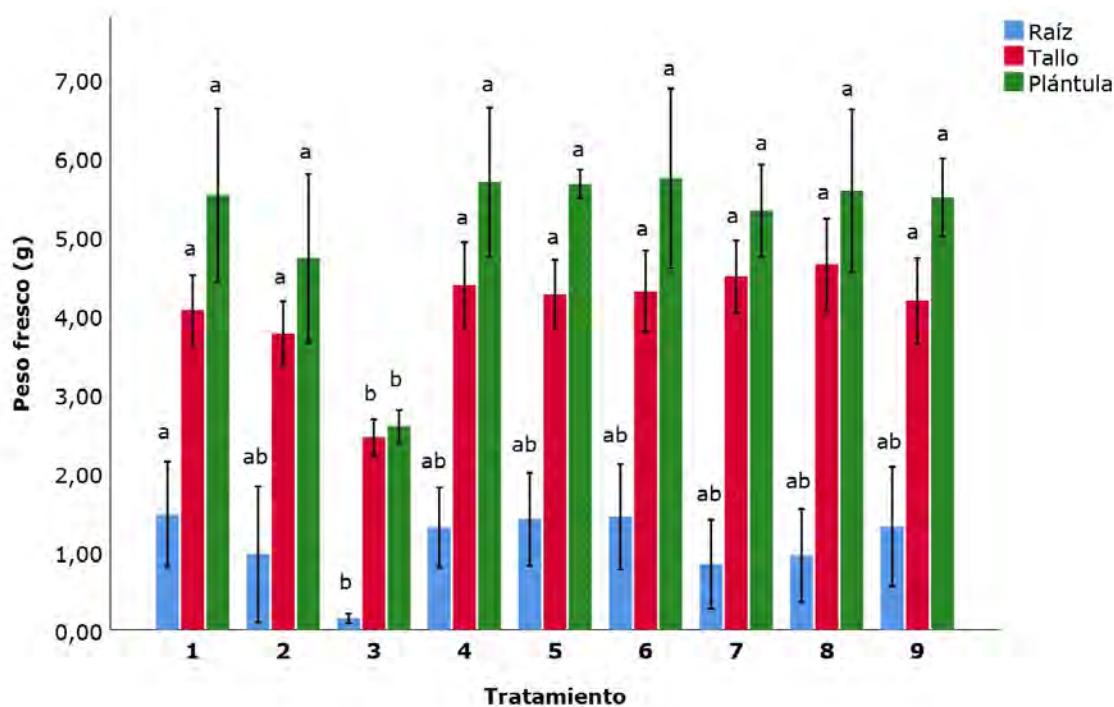


Figura 4. Peso fresco de la raíz, tallo y plántula por tratamiento. Los valores indicados con distinta letra difieren estadísticamente ($p<0.05$). Cada variable respuesta fue analizada de manera independiente con respecto a los tratamientos 1 al 9 descritos y nombrados en la Tabla 1

Fuente: autores.

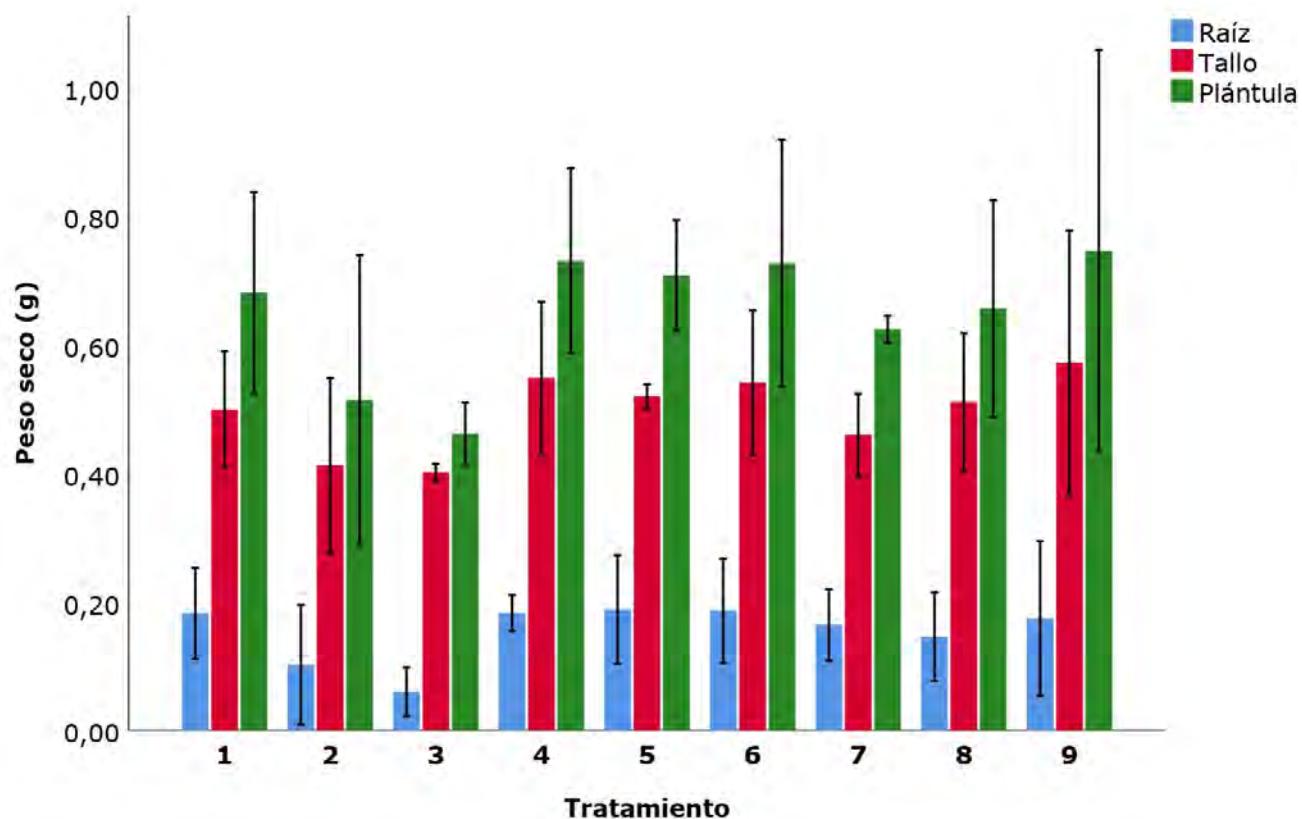


Figura 5. Peso seco de la raíz, tallo y plántula por tratamiento. Los valores indicados no presentaron diferencia significativa ($p<0.05$) por lo que todos se encuentran en un mismo grupo estadístico. Cada variable respuesta fue analizada de manera independiente con respecto a los tratamientos 1 al 9 descritos y nombrados en la Tabla 1

Fuente: autores.

Identificación y análisis filogenético

La identificación molecular solo se realizó para el aislamiento e IB4B, TV2 y UCMV21, ya que fueron los microorganismos que destacaron durante el estudio y con quienes se realizó el análisis de actividad antifúngica en condiciones de invernadero en plantas de uchuva. Para ello

se realizó la amplificación de regiones de DNA barcoding 16S para la bacteria e ITS para los hongos.

La alineación final del conjunto de datos de ARNr 16S consistió en 15 individuos, 12 especies nominales de *Bacillus* sp. y un grupo externo para enraizar el análisis (*Escherichia coli*). Del conjunto de datos de la región ITS de *Fusarium* sp. y *Trichoderma* sp. se hizo un análisis inde-

pendiente con 18 y 20 individuos, 13 especies nominales de *Fusarium* sp., 15 especies nominales de *Trichoderma* sp. y un grupo externo para enraizar el análisis el análisis (*Aspergillus niger*).

Los resultados del enfoque SLSD de IB4B mostraron estimaciones discordantes entre locmin, gmyc y bgmyc con tres, dos y cinco especies putativas, respectivamente (Figura 6). El análisis locmin optimizó un umbral de divergencia de 0.032 (distancia p) para el conjunto de datos, permitiendo la delimitación de tres especies putativas del género *Bacillus*. Ninguno de los tres métodos de delimitación de especies de locus único pudo delimitar la totalidad de las especies nominales de *Bacillus*, sin embargo, lograron diferenciar el género *Bacillus* del grupo control (*E. coli*), por lo cual el aislamiento obtenido en esta investigación es consistente con el género *Bacillus*, lo cual fue similar a lo identificado en BLASTn, dado que los aislamientos, coincidían con múltiples especies/cepas que mostraban puntuaciones de identidad y valores E iguales.

Estas dificultades de diferenciación filogenética entre especies del género *Bacillus* ya han sido reportada con anterioridad, debido a la naturaleza altamente conservada del gen 16S rRNA (Rooney *et al.*, 2009). Lo cual ha traído consigo un mal uso permanente en la descripción de importantes cepas de biocontrol de este género, como lo demuestra Fan *et al.* (2017) en su estudio, en el que muchos de los genomas de *Bacillus* sp. disponibles públicamente se encuentran asignados de manera inconsistente. De acuerdo con este autor, a menudo se designan como *B. subtilis* a microorganismos representantes de *B. velezensis* que simultáneamente pertenece al grupo operativo *B. amyloliquefaciens* comprendido por las especies de *B. amyloliquefaciens*, *B. velezensis* y *B. siamensis*, que se encuentran estrechamente relacionadas, tal y como se evidenció en el presente estudio, en el que los clados no están claramente diferenciados y no es posible determinar con exactitud la especie del aislado IB4B.

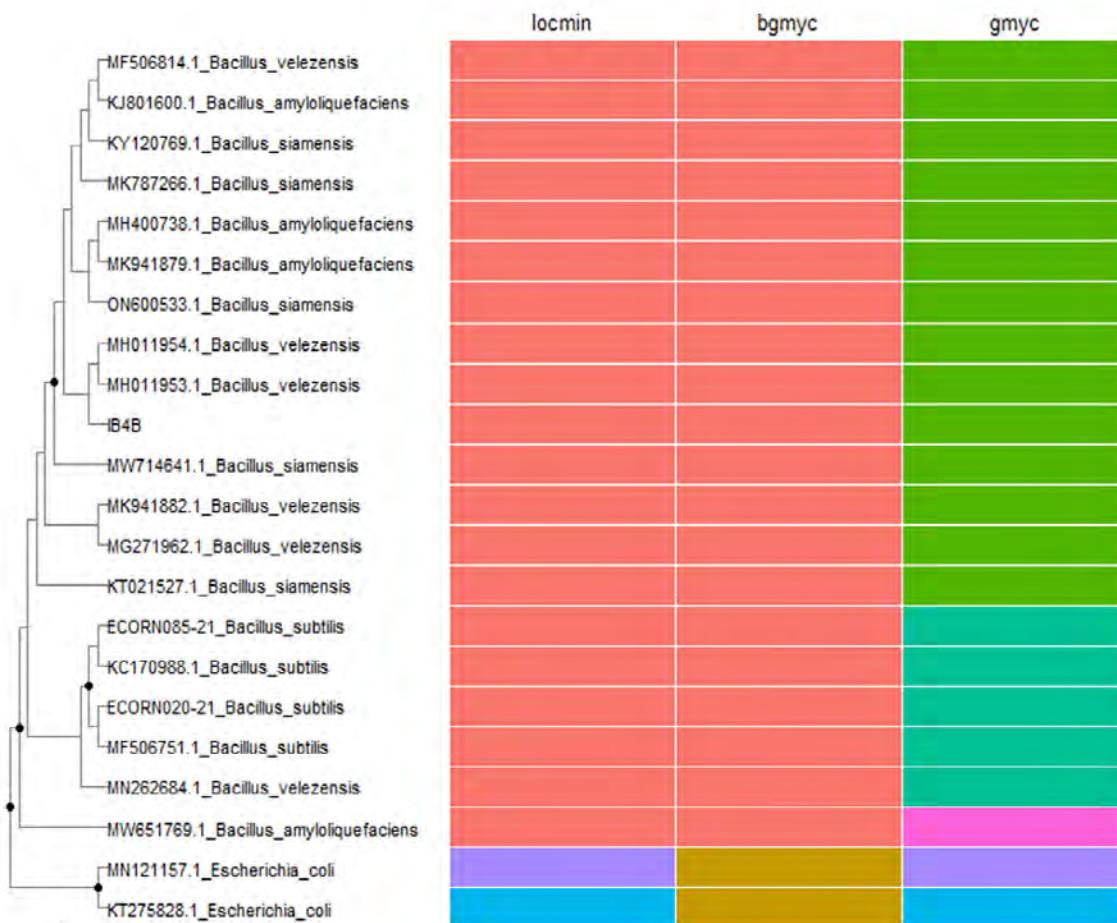


Figura 6. Árbol filogenético y análisis de delimitación de especie por locmin, gmyc y bgmyc para el aislado IB4B

Fuente: autores.

Por otro lado, en esta prueba, TV2 mostró estimaciones puntuales concordantes entre locmin y bgmyc con dos especies putativas; mientras que gmmyc fue discordante con estos métodos, con seis especies putativas (Figura 7). El análisis locmin optimizó un umbral de divergencia de 0.195, por otro lado, solamente el método gmmyc pudo delimitar la totalidad de las especies nominales y el grupo control, por lo cual TV2 es consistente con *Trichoderma asperellum*, esto fue similar a lo identificado en BLASTn, que mostraba una identidad del 98% con esta especie.

Los resultados concuerdan con los reportados por Gunaratna *et al.* (2019) quienes por análisis de la región ITS 1 y 4 lograron identificar dos aislados con actividad antagonista como *T. asperellum* y *T. virens* con más del 90% de similitud en comparación con las bases de datos y con la filogenia realizada por Kariuki *et al.* (2020) de tres aislados fúngicos identificados como *T. asperellum* y *T. harzianum*, demostrando la viabilidad de utilizar tales marcadores moleculares para la identificación correcta de estos aislados, tal y como se evidencia en la Figura 7.

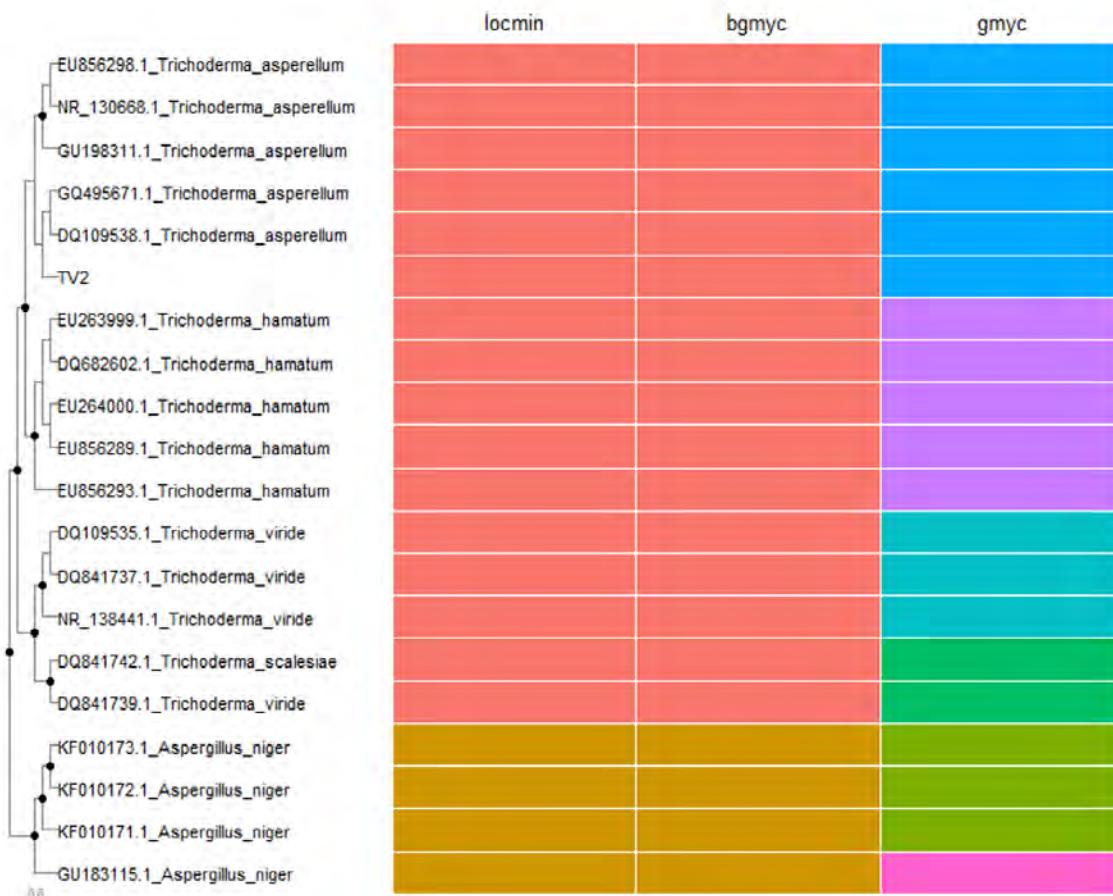


Figura 7. Árbol filogenético y análisis de delimitación de especie por locmin, gmvc y bgmyc para el aislado TV2

Fuente: autores.

Para UCMV21 los análisis mostraron estimaciones discordantes entre los tres métodos de delimitación con dos, tres y nueve especies putativas, respectivamente. El análisis locmin optimizó un umbral de divergencia de 0.217, permitiendo la delimitación de dos especies putativas del género *Fusarium* (Figura 8). Únicamente el modelo gmvc logró delimitar por completo las especies nominales del género, al igual que el grupo control (*A. niger*), clasificando a UCMV21 dentro del grupo nominal *Fusarium oxysporum*. Esto fue similar a lo identificado inicialmente en BLASTn, dado que los aislamientos, coincidían con

múltiples cepas con identidades entre el 85 y 90%. Al igual que con *T. asperellum*, las regiones ITS evaluadas, permitieron la identificación de *F. oxysporum* al igual que Bektast y Kusek (2019) quienes mediante los cebadores fúngicos universales ITS1 e ITS4 amplificaron con éxito para todas las cepas altamente virulentas con un 90% de similitud con *F. oxysporum* para los 41 aislados reportados, siendo esta región la más utilizada para estudios filogenéticos en *F. oxysporum*, debido a la especificidad de especie y por proporcionar mejores distinción a nivel de subespecies (Schoch *et al.*, 2012; Suga *et al.*, 2000).

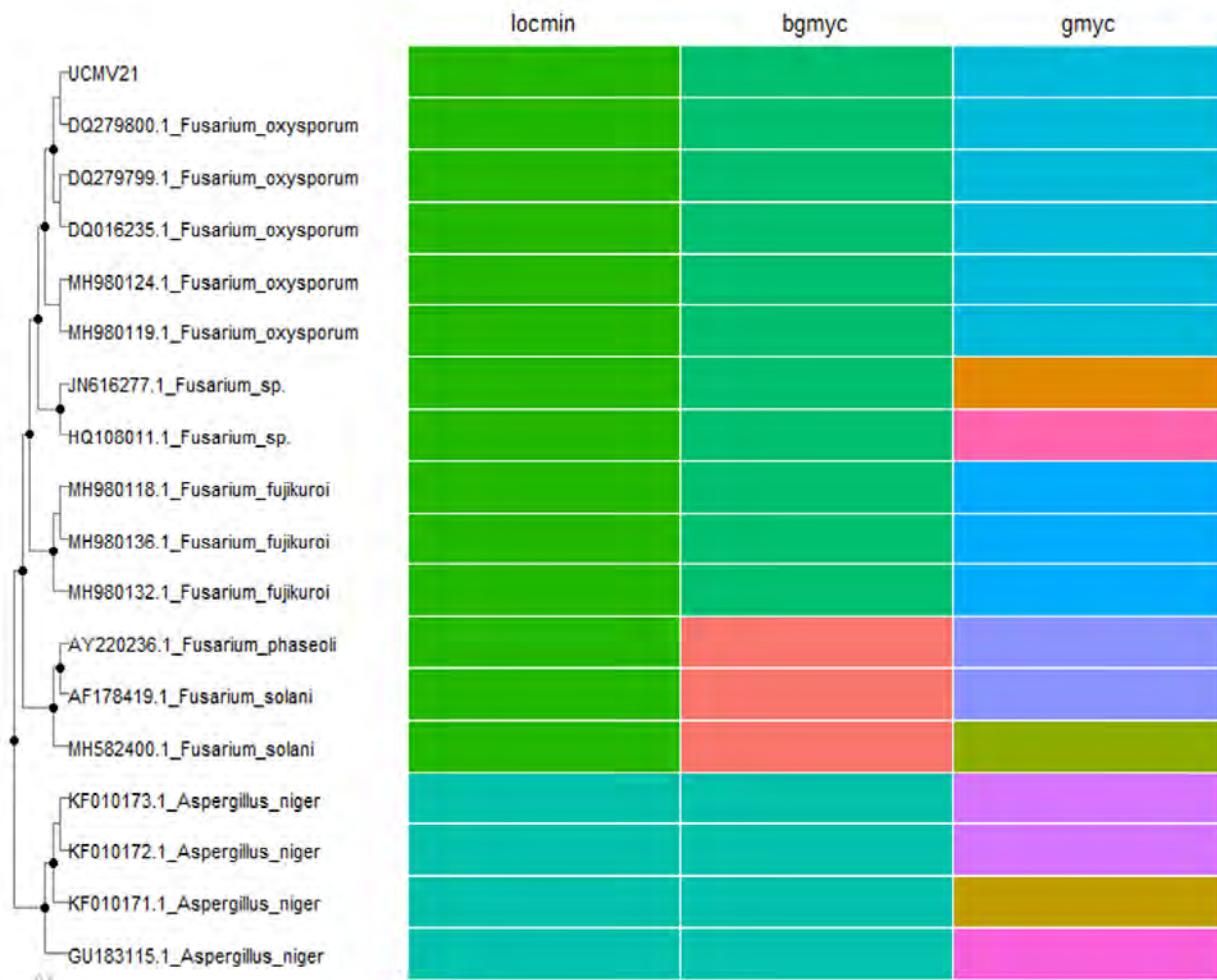


Figura 8. Árbol filogenético y análisis de delimitación de especie por locmin, gmyc y bgmyc para el aislado UCMV21.

Fuente: autores.

4 CONCLUSIONES

Se aislaron 12 bacterias del género *Bacillus* a partir de muestras de suelo de la rizosfera de plantas sanas y 9 de muestras de suelo de plantas con sintomatología de infección por *Fusarium* sp. Igualmente, se obtuvieron tres aislados del género *Fusa-*

rium a partir de muestras de material vegetal recolectado en los dos sitios de muestreo visitado. En este estudio se evidenció la actividad antagonista del aislado TV2 identificado como *Trichoderma asperellum* e IB4B (*Bacillus* sp.) frente a UCMV21 iden-

tificado como *Fusarium oxysporum*, un patógeno de semillas y plántulas de uchuva que según pruebas *in vitro* e *in vivo* redujo la germinación en un 58% en caja Petri y disminuyó los parámetros biométricos medidos en condiciones de invernadero. Tanto de forma individual como en consorcio microbiano, *T. asperellum* y *Bacillus* sp. mejoraron los parámetros biométricos de la planta, especialmente la longitud de

raíz de las plántulas, posiblemente por la producción de fitohormonas que serían de interés para un futuro estudio; adicionalmente, para confirmar la buena actividad reportada de los biocontroladores que se equipara estadísticamente con el control químico, es necesario nuevos análisis utilizando un *Fusarium* sp. mucho más patógeno y virulento que el estudiado.

CONTRIBUCIÓN DE LA AUTORÍA ■

Marcela Mora López: investigación, análisis de datos, conceptualización, escritura y borrador original. Ana María Ochoa Aristizábal: investigación, análisis de datos, escritura, revisión y edición. Víctor Manuel Osorio Echeverri: logística, revisión y edición.

AGRADECIMIENTOS ■

Los autores agradecen al personal de la Central de materiales del Laboratorio de Biotecnología y a la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia por el apoyo económico y logístico para

el desarrollo de este proyecto. Especialmente queremos agradecer a Alejandro Mejía por su colaboración en las pruebas moleculares.

LITERATURA CITADA

Agarwal, M., Dheeman, S., Dubey, R. C., Kumar, P., Maheshwari, D. K., and Bajpai, V. K. (2017). Differential antagonistic responses of *Bacillus pumilus* MSUA3 against *Rhizoctonia solani* and *Fusarium oxysporum* causing fungal diseases in *Fagopyrum esculentum* Moench. *Microbiological Research*, 205, 40–47. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2017.08.012>

Al-ani, L. K. T., and Albaayit, S. F. A. (2018). Antagonistic of some *Trichoderma* against *Fusarium oxysporum* sp. f. cubense tropical race 4 (FocTR4). *The Eurasia Proceedings of Science, Technology, Engineering & Mathematics (EP-STEM)*, 2, 35–38.

Alcántara, J. S., Acero, J., Alcantara, J. D. y Sánchez, R. M. (2019). Principales reguladores hormonales y sus interacciones en el crecimiento vegetal. *Nova*, 17(32), 109-129. <https://doi.org/10.22490/24629448.3639>

Altschul, S.F., Gish, W., Miller, W., Myers, E.W., and Lipman, D.J. (1990). Basic local alignment search tool. *Journal of Molecular Biology*, 215, 403–410. [https://doi.org/10.1016/S0022-2836\(05\)80360-2](https://doi.org/10.1016/S0022-2836(05)80360-2)

Anusha, B. G., Gopalakrishnan, S., Naik, M. K., and Sharma, M. (2019). Evaluation of *Streptomyces* spp. And *Bacillus* spp. For biocontrol of *Fusarium* wilt in

chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Archives of Phytopathology and Plant Protection*, 52(5-6), 417-442. <https://doi.org/10.1080/03235408.2019.1635302>

Bakker, M. G., Brown, D. W., Kelly, A. C., Kim, H.-S., Kurtzman, C. P., McCormick, S. P., O'Donnell, K. L., Proctor, R. H., Vaughan, M. M., and Ward, T. J. (2018). *Fusarium* mycotoxins: a trans-disciplinary overview. *Canadian Journal of Plant Pathology*, 40(2), 161–171. <https://doi.org/10.1080/07060661.2018.1433720>

Barnett, H. L., and Hunter, B. B. (1998). *Illustrated genera of imperfect fungi* (Fourth ed). Burgess Publishing Company.

Bazalar, M. S., Nazareno, M. A., and Viturro, C. I. (2019). Nutritional and Anti-oxidant Properties of *Physalis peruviana* L. Fruits from the Argentinean Northern Andean Region. *Plant Foods for Human Nutrition*, 74(1), 68–75. <https://doi.org/10.1007/s11130-018-0702-1>

Bektast, I., and Kusek, M. (2019). Phylogenetic and morphological characterization of *Fusarium oxysporum* F. Sp. Cepae the causal agent of basal rot on onion isolated from Turkey. *Fresenius Environmental Bulletin*, 28(3), 1733–1742. <https://www.researchgate.net/publication/332633592>

- Brown, S., Collins, R., Boyer, S., Lefort, M., Malumbres-Olarte, J., Vink, C., and Cruickshank, R. (2012). Spider: An R package for the analysis of species identity and evolution, with particular reference to DNA barcoding. *Molecular Ecology Resources*, 12, 562–565. <https://doi.org/10.1111/j.1755-0998.2011.03108.x>
- Calle, C. (2017). *Caracterización fenotípica y molecular de aislamientos de Phytophthora cinnamomi obtenidos de huertos de aguacate del departamento de Antioquia, Colombia*. [Tesis de maestría]. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/59932>
- Chang, X., Li, H., Naeem, M., Wu, X., Yong, T., Song, C., Liu, T., Chen, W., and Yang, W. (2020). Diversity of the Seedborne Fungi and Pathogenicity of *Fusarium* Species Associated with Intercropped Soybean. *Pathogens*, 9(7), 531. <https://doi.org/10.3390/pathogens9070531>
- Chaves-Gómez, J. L., Chávez-Arias, C. C., Prado, A. M. C., Gómez-Caro, S., and Restrepo-Díaz, H. (2021). Mixtures of biological control agents and organic additives improve physiological behavior in cape gooseberry plants under vascular wilt disease. *Plants*, 10(10), 2059. <https://doi.org/10.3390/plants10102059>
- Choudhary, D. K., Prakash, A., and Johri, B. N. (2007). Induced systemic resistance (ISR) in plants: mechanism of action. *Indian Journal of Microbiology*, 47(4), 289–297. <https://doi.org/10.1007/s12088-007-0054-2>
- Corrales-Bernal, A., Vergara, A., Rojano, B., Yahia, E. y Maldonado, M. (2015). Características nutricionales y antioxidantes de la uchuva colombiana (*Physalis peruviana L.*) en tres estadios de su maduración. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 65(4).
- Correll, J. C., Puhalla, J. E., and Schneider, R. W. (1986). Identification of *Fusarium oxysporum* f. sp. apii on the basis of colony size, virulence, and vegetative compatibility. *Phytopathology*. *Phytopathology*, 76, 396–400. <https://doi.org/10.1094/Phyto-76-396>
- Darriba, D., Taboada, G. L., Doallo, R., and Posada, D. (2012). jModelTest 2: more models, new heuristics, and parallel computing. *Nature Methods*, 9(8), 772–772. <https://doi.org/10.1038/nmeth.2109>
- de Lamio, F. J., and Takken, F. L. W. (2020). Biocontrol by *Fusarium oxysporum* Using Endophyte-Mediated Resistance. *Frontiers in Plant Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00037>
- Díaz, A., Smith, A., Zapata, J. y Mesa, P. (2012). *Avances en el manejo y control de Fusarium oxysporum en el cultivo de uchuva (Physalis peruviana)*. Corporación colombiana de investigación agropecuaria - AGROSAVIA
- Drummond, A.J., and Rambaut, A. (2007). BEAST: Bayesian evolutionary anal-

- ysis by sampling trees. *BMC Evolutionary Biology*, 7, 1–8. <https://doi.org/10.1186/1471-2148-7-214>
- Drummond, A.J., Suchard, M.A., Xie, D., and Rambaut, A. (2012). Bayesian phylogenetics with BEAUTi and the BEAST 1.7. *Molecular Biology and Evolution*, 29, 1969–1973. <https://doi.org/10.1093/molbev/mss075>
- Dwivedi, N., and Dwivedi, S. K. (2020). Soil Solarization: An ecofriendly technique to eradicate soil fusaria causing wilt disease in guava (*Psidium Guajava*). *International Journal of Fruit Science*, 20(sup3), S1765–S1772. <https://doi.org/10.1080/15538362.2020.1833808>
- Fan, B., Blom, J., Klenk, H.-P., and Borriss, R. (2017). *Bacillus amyloliquefaciens*, *Bacillus velezensis*, and *Bacillus siamensis* Form an “Operational Group *B. amyloliquefaciens*” within the *B. subtilis* Species Complex. *Frontiers in Microbiology*, 8. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00022>
- Fira, D., Dimkić, I., Berić, T., Lozo, J., and Stanković, S. (2018). Biological control of plant pathogens by *Bacillus* species. *Journal of Biotechnology*, 285, 44–55. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2018.07.044>
- Fischer, G., Almanza-merchán, P. J., and Miranda, D. (2014). Importancia y cultivo de la Uchuva (*Physalis peruviana* L.). *Scielo*, 36(1), 1–15. <https://doi.org/10.1590/0100-2945-441/13>
- Fujisawa, T., and Barraclough, T.G. (2013). Delimiting species using single-locus data and the generalized mixed yule coalescent approach: A revised method and evaluation on simulated data sets. *Systematic Biology*, 62, 707–724. <https://doi.org/10.1093/sysbio/syt033>
- Gautam, S. S., Kanchan, K., and Satsangi, G. P. (2015). Effect of *Trichoderma* species on germination and growth of *Mungbean* (*Vigna radiata L.*) and its antagonistic effect against fungal pathogens. *Revista Internacional de Investigación Avanzada (IJAR)*, 3(2), 153–157.
- Granados, W., Muñoz, C. A. y Aguillón, D. M. (2019). Cadena de la uchuva. Ministerio de agricultura. https://sioc.minagricultura.gov.co/Pasifloras/Documentos/2019-06-30_Cifras Sectoriales UCHUVA.pdf
- Gunaratna, L. N. R., Deshapriya, N., Jayaratne, D. L., and Rajapaksha, R. G. S. A. S. (2019). Damping-off disease of big onion (*Allium cepa* L.) in Sri Lanka and evaluation of *Trichoderma asperellum* and *Trichoderma virens* for its control. *Tropical Plant Research*, 6(2), 275–292. <https://doi.org/10.22271/tpr.2019.v6.i2.036>
- Heuer, H., Krsek, M., Baker, P., Smalla, K., and Wellington, E. M. (1997). Analysis of actinomycete communities by specific amplification of genes encoding 16S rRNA and gel-electrophoretic separation in denaturing gradients. *Applied and Environmental Microbiology*, 63(8),

3233–3241. <https://doi.org/10.1128/aem.63.8.3233-3241.1997>

Hu, M., and Chen, S. (2021). Non-target site mechanisms of fungicide resistance in crop pathogens: A review. *Microorganisms*, 9(3), 1–19. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9030502>

Hudson, O., Fulton, J. C., Dong, A. K., Dufault, N. S., and Ali, M. E. (2021). *Fusarium oxysporum* f. sp. *niveum* Molecular Diagnostics Past, Present and Future. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(18), 9735. <https://doi.org/10.3390/ijms22189735>

Infante, D., Martínez, B., González, N. y Reyes, Y. (2009). Mecanismos de acción de *Trichoderma* frente a hongos fitopatógenos. *Revista de Protección Vegetal*, 1, 14–21.

Instituto Colombiano Agropecuario (ICA). (2022, mayo 17). Colombia es el mayor productor y exportador de Uchuva a nivel mundial. *Portal Corporativo ICA*. <https://www.ica.gov.co/noticiasica-colombia-mayor-productor-exportador-uchuva#:~:text=445%2C%20y%20en%20toneladas%20aumentaron,y%20exportador%20de%20esta%20fruta.>

Islam, M. A., Nain, Z., Alam, M. K., Banu, N. A., and Islam, M. R. (2018). *In vitro* study of biocontrol potential of rhizospheric *Pseudomonas aeruginosa* against *Fusarium oxysporum* f. sp. *cucumerinum*. *Egyptian Journal of Biologi-*

cal Pest Control, 28(1), 90. <https://doi.org/10.1186/s41938-018-0097-1>

Jamil, A., and Ashraf, S. (2020). Utilization of chemical fungicides in managing the wilt disease of chickpea caused by *Fusarium oxysporum* f. sp. *ciceri*. *Archives of Phytopathology and Plant Protection*, 53(17–18), 876–898. <https://doi.org/10.1080/03235408.2020.1803705>

Kariuki, W. G., Mungai, N. W., Otaye, D. O., Thuita, M., Muema, E., Korir, H., and Masso, C. (2020). Antagonistic effects of biocontrol agents against *Phytophthora infestans* and growth stimulation in tomatoes. *African Crop Science Journal*, 28(s1), 55–70. <https://doi.org/10.4314/acsj.v28i1.5S>

Kearse, M., Moir, R., Wilson, A., Stones-Havas, S., Cheung, M., Sturrock, S., Buxton, S., Cooper, A., Markowitz, S., Duran, C., Thierer, T., Ashton, B., Meintjes, P., and Drummond, A. (2012). Genious Basic: an integrated and extendable desktop software platform for the organization and analysis of sequence data. *Bioinformatics*, 28, 1647–1649. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/bts199>

Kumari, M., Sharma, O. P., Sharma, K., Bagri, R., and Nathawat, B. (2020). Management of *Fusarium oxysporum* f. sp. *Lentis* various systemic and non-systemic fungicides *in vitro*. *International Journal of Chemical Studies*, 8(5), 2717–2720. <https://doi.org/10.22271/chemi.2020.v8.i5ak.10729>

- Lane, D. (1991). 16S/23S rRNA sequencing, in: Stackebrandt, E., Goodfellow, M. (Eds.), *Nucleic Acid Techniques in Bacterial Systematics* (pp. 115-175). John Wiley and Sons.
- Li, N., Alfiky, A., Wang, W., Islam, M., Nourollahi, K., Liu, X., and Kang, S. (2018). Volatile compound-mediated recognition and inhibition between *Trichoderma* biocontrol agents and *Fusarium oxysporum*. *Frontiers in Microbiology*, 9. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.02614>
- Liu Y., Zhang N., Qiu M., Feng H., Vivanco J., Shen Q., et al. (2014). Enhanced rhizosphere colonization of beneficial *Bacillus amyloliquefaciens* SQR9 by pathogen infection. *FEMS Microbiol Lett*, 353(1), 49-56. Doi: <https://doi.org/10.1111/1574-6968.1240>
- Machado, V.N., Collins, R.A., Ota, R.P., Andrade, M.C., Farias, I.P., and Hrbek, T. (2018). One thousand DNA barcodes of piranhas and pacus reveal geographic structure and unrecognised diversity in the Amazon. *Scientific Reports*, 8, 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-26550-x>
- Madden, T. L., Tatusov, R. L., and Zhang, J. (1996). Applications of network BLAST server. [https://doi.org/10.1016/S0076-6879\(96\)66011-X](https://doi.org/10.1016/S0076-6879(96)66011-X)
- Mayorga-Cubillos, F., Arguelles, J., Rodríguez, E., Almario, C., Ariza, C., and Barrero, L. (2019). Yield and physico-chemical quality of *Physalis peruviana* L. Fruit related to the resistance response against *Fusarium oxysporum* f. sp. physali. *Agronomia Colombiana*, 37(2), 120–128. <https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v37n2.77550>
- Mukhopadhyay, R., and Kumar, D. (2020). *Trichoderma*: a beneficial antifungal agent and insights into its mechanism of biocontrol potential. *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, 30(1), 133. <https://doi.org/10.1186/s41938-020-00333-x>
- Nayyar, B. G., Woodward, S., Mur, L. A. J., Akram, A., Arshad, M., Naqvi, S. M. S., and Akhund, S. (2018). Identification and pathogenicity of *Fusarium* species associated with sesame (*Sesamum indicum* L.) seeds from the Punjab, Pakistan. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 102, 128–135. <https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2018.02.001>
- Paradis, E., Claude, J., and Strimmer, K. (2004). APE: Analyses of phylogenetics and evolution in R language. *Bioinformatics*, 20, 289–290. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btg412>
- Perincherry, L., Lalak-Kańczugowska, J., and Stępień, Ł. (2019). Fusarium-Produced Mycotoxins in Plant-Pathogen Interactions. *Toxins*, 11(11), 664. <https://doi.org/10.3390/toxins11110664>
- Podgórska-Kryszczuk, I., Solarska, E., and Kordowska-Wiater, M. (2022). Biological Control of *Fusarium culmorum*, *Fusarium graminearum* and *Fusarium poae* by Antagonistic Yeasts. *Pathogens*, 11(1), 86. <https://doi.org/10.3390/pathogens11010086>

R Development Core Team. (2014). *R: A language and environment for statistical computing*.

Rambaut, A., Drummond, A.J., Xie, D., Baele, G., and Suchard, M.A. (2018). Posterior summarization in Bayesian phylogenetics using Tracer 1.7. *Systematic Biology*, 67, 901–904. <https://doi.org/10.1093/sysbio/syy032>

Raupach, G. S., and Kloepper, J. W. (1998). Mixtures of plant growth-promoting rhizobacteria enhance biological control of multiple cucumber pathogens. *Phytopathology®*, 88(11), 1158–1164. <https://doi.org/10.1094/PHYTO.1998.88.11.1158>

Realpe, C. E., Villegas, C., and Riaño, N. M. (2006). Aislamiento y caracterización morfológica de *Rosellinia pepo* Pat. en plantas de macadamia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía*, 59(2), 3509–3526.

Rebollido, R., Martínez, J., Aguilera, Y., Melchor, K., Koerner, I., and Stegmann, R. (2008). Microbial populations during composting process of organic fraction of municipal solid waste. *Applied Ecology and Environmental Research*, 6, 61–67. https://doi.org/10.15666/aeer/0603_061067

Rentería-Martínez, M. E., Guerra-Camacho, M. Á., Ochoa-Meza, A., Moreno-Salazar, S. F., Meza-Moller, A. D. C., and Guzmán-Ortiz, J. M. (2018). Description and comparison among morphotypes of *Fusarium brachygibbosum*, *F. falciforme* and *F. oxysporum*

pathogenic to watermelon in Sonora, México. *Revista Mexicana de Fitopatología, Mexican Journal of Phytopathology*, 37(1). <https://doi.org/10.18781/R.MEX.FIT.1808-1>

Rooney, A. P., Price, N. P., Ehrhardt, C., Swezey, J. L., and Bannan, J. D. (2009). Phylogeny and molecular taxonomy of the *Bacillus subtilis* species complex and description of *Bacillus subtilis* subsp. *inaquosorum* subsp. nov. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 59, 2420–2436. <https://doi.org/10.1099/ijs.0.009126-0>

Schoch, C.L., Seifert, K.A., Huhndorf, S., Robert, V., Spouge, J.L., Levesque, C.A., and Miller, A.N. (2012). Nuclear ribosomal internal transcribed spacer (ITS) region as a universal DNA barcode marker for Fungi. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(16), 6241–6246. <https://doi.org/10.1073/pnas.1117018109>

Simbaqueba, J., Rodríguez, E. A., Burbano-David, D., González, C., and Carro-Quintero, A. (2021) Putative novel effector genes revealed by the genomic analysis of the phytopathogenic fungus *Fusarium oxysporum* f. sp. *physali* (Foph) that infects cape gooseberry plants. *Frontiers in Microbiology*, 11, 593915. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.593915>

Suga, H., Hasegawa, T., Mitsui, H., Kageyama, K. and Hyakumachi, M. (2000). Phylogenetic analysis of the phytopathogenic fungus *Fusarium solani* based

- on the rDNA-ITS region. *Mycological Research*, 104(10), 1175–1183. <https://doi.org/10.1017/S0953756200002719>
- Toloza-Moreno, D. L., Lizarazo-Forero, L. M., and Uribe-Vélez, D. (2020). Antagonist capacity of bacteria isolated from cape gooseberry cultures (*Physalis peruviana* L.) for biological control of *Fusarium oxysporum*. *Tropical Plant Pathology*, 45(1). <https://doi.org/10.1007/s40858-019-00313-z>
- Tsegaye Redda, E., Ma, J., Mei, J., Li, M., Wu, B., and Jiang, X. (2018). Antagonistic Potential of Different Isolates of *Trichoderma* against *Fusarium oxysporum*, *Rhizoctonia solani*, and *Botrytis cinerea*. *European Journal of Experimental Biology*, 08(02). <https://doi.org/10.21767/2248-9215.100053>
- Vega-Torres, M. G., Ruiz-Cisneros, M. F., Pérez-Corral, D. A., Berlanga-Reyes, D. I., Ornelas-Paz, J. D. J., Rios-Velasco, C., Cambero-Campos, O. J., Estrada-Virgen, M. O., Luna-Esquível, G. y Denise-Revérchon, F. L. (2019). Actividad antifúngica *in vitro* de microorganismos antagonistas contra *Fusarium oxysporum* de rizosfera de árboles de aguacate en Xalisco, Nayarit, México. *Mexican Journal of Phytopathology*, 37(1), 57–64. <https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.1904-3>
- Villarreal-Delgado, M. F., Villa-Rodríguez, E. D., Cira-Chávez, L. A., Estrada-Alvarado, M. I., Parra-Cota, F. I., and De los Santos-Villalobos, S. (2018). The genus *Bacillus* as a biological control agent and its implications in the agricultural biosecurity. *Mexican Journal of Phytopathology*, 36(1), 95–130. <https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.1706-5>
- White, T.J., Bruns, T., Lee, S., and Taylor, J.W. (1990). Amplification and direct sequencing of fungal ribosomal RNA genes for phylogenetics. En: Innis, M.A., Gelfand, D.H., Sninsky, J.J., White, T.J., (Eds). *PCR Protocols: A Guide to Methods and Applications* (pp. 315–322). Academic Press Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-372180-8.50042-1>
- Win, T. T., Bo, B., Malec, P., and Fu, P. (2021). The effect of a consortium of *Penicillium* sp. and *Bacillus* spp. in suppressing banana fungal diseases caused by *Fusarium* sp. and *Alternaria* sp. *Journal of Applied Microbiology*, 131(4), 1890–1908. <https://doi.org/10.1111/jam.15067>
- Yu, G., Smith, D.K., Zhu, H., Guan, Y., and Lam, T.T.-Y. (2017). ggtree: an R package for visualization and annotation of phylogenetic trees with their covariates and other associated data. *Methods in Ecology and Evolution*, 8, 28–36. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12628>
- Zaim, S., Bekkar, A. A., and Belabid, L. (2018). Efficacy of *Bacillus subtilis* and *Trichoderma harzianum* combination on chickpea *Fusarium* wilt caused by *F. oxysporum* f. sp. *ciceris*. *Archives of Phytopathology and Plant Protection*, 51(3–4), 217–226. <https://doi.org/10.1080/03235408.2018.1447896>

Zeigler, D. R., and Perkins, J. B. (2021). The Genus *Bacillus*. En L. H. Green & E. Goldman (Eds.), *Practical Handbook of Microbiology*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003099277>

Zhou, X., Wang, J.-T., Wang, W.-H., Tsui, C. K., and Cai, L. (2021). Changes in

bacterial and fungal microbiomes associated with tomatoes of healthy and infected by *Fusarium oxysporum* f. sp. lycopersici. *Microbial Ecology*, 81(4), 1004–1017. <https://doi.org/10.1007/s00248-020-01535-4>

Conflictos de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.



Licencia de Creative Commons

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



Fecha de recibido: 06-06-2023

Fecha de aceptado: 29-09-2023

10.22490/21456453.6875

ANÁLISIS DE CRECIMIENTO DEL PASTO KIKUYO *Cenchrus clandestinus* (*Hochst. Ex Chiov.*) *Morrone* FERTILIZADO CON DIFERENTES NIVELES DE NITRÓGENO

GROWTH ANALYSIS OF KIKUYO GRASS *Cenchrus clandestinus* (*Hochst. ex Chiov.*) *Morrone* FERTILIZED WITH DIFFERENT LEVELS OF NITROGEN

Dania Fonseca-López¹

Carlos Eduardo Rodríguez-Molano²

Nelson Vivas-Quilla³

Pedro Almanza-Merchán⁴

Helber Balaguera-López⁵

¹ Doctora en Ciencias Agrarias y Agroindustriales,
Universidad Santo Tomás, Tunja, Colombia.
correo dania@gmail.com

²Doctor en Ciencias Biológicas y Ambientales, Universidad Pedagógica y Tecnológica
de Colombia, Tunja, Colombia. carlos.
rodriguez@uptc.edu.co

³Doctor en Ciencias Agrarias, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia,
nvivas@unicauca.edu.co

⁴Doctor en Ciencias Agropecuarias, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia,
Tunja, Colombia. pedro.almanza@uptc.edu.co

⁵Doctor en Ciencias Agrarias. Universidad Nacional. Bogotá, Colombia.
helber.balaguera@uptc.edu.co

Citación: Fonseca-López, D., Rodríguez-Molano, C., Vivas-Quilla, N., Almanza-Merchán, P. y Balaguera-López, H. (2024). Análisis de crecimiento del pasto kikuyo *Cenchrus clandestinus* (*Hochst. Ex Chiov.*) *Morrone* fertilizado con diferentes niveles de nitrógeno.

Revista de Investigación Agraria y Ambiental, 15(2), 69-89.

<https://doi.org/10.22490/21456453.6875>

■ RESUMEN

Contextualización: la respuesta productiva del forraje está determinada por factores inherentes al ecotipo y condiciones externas tanto ambientales como de manejo. La alta variación de factores que influyen en el crecimiento del forraje implican la necesidad de determinar respuestas de acuerdo con el desarrollo biológico en relación con la temperatura acumulada.

Vacío de conocimiento: se desconoce la respuesta de crecimiento de *Cenchrus clandestinus* expresada en Grados Días Calor (GDCA) cuando se fertiliza con diferentes dosis de N para establecer con precisión tiempos de pastoreo en el pico de acumulación de biomasa.

Propósito: determinar la dinámica de crecimiento del pasto kikuyo con diferentes niveles de fertilización nitrogenada.

Metodología: se evaluó un tratamiento control en el que no se aplicó ninguna fuente de N (T0); una dosificación de 100 kg. N ha.⁻¹ (T1) y una dosificación de 150 kg. N ha.⁻¹ (T2). El plan de fertilización se

programó para defoliaciones de 42 días con altura residual de 10 cm; posteriormente, se evaluó con siete días de frecuencia el crecimiento de pasto kikuyo, a partir del análisis de materia seca, contenido de clorofila, conductancia estomática, número de hojas, altura, área foliar y materia seca de hojas y tallos. A partir de la materia seca del forraje se calcularon los índices de crecimiento: Tasa Absoluta de Crecimiento (TAC), Tasa Relativa de Crecimiento (TRC), Tasa de Asimilación Neta (TAN), Área Foliar Específica (AFE), Relación de Área Foliar (RAF) y el Índice de Área Foliar (IAF). Se realizó análisis de medidas repetidas en el tiempo para determinar el efecto por punto de muestreo (GDCA).

Resultados y conclusiones: Con la aplicación de 150 kg. N ha⁻¹ (T2) y 208.6 GDCA (42 días), las plantas presentaron mayor velocidad de crecimiento, producción de tejido foliar, área foliar y mayor altura.

Palabras clave: fertilización, forraje, gramínea, tasa de crecimiento

ABSTRACT

Contextualization: forage production response is determined by factors inherent to the ecotype and external environmental and management conditions. The high variation of factors influencing forage growth implies the need to establish responses based on the biological development regarding the accumulated temperature.

Knowledge gap: the growth response of *Cenchrus Clandestinus* expressed in heating degree days (HDDs) when fertilized with different doses of N is unknown to establish grazing times at peak biomass accumulation accurately.

Purpose: to determine the growth dynamics of kikuyu grass with different levels of nitrogen fertilization.

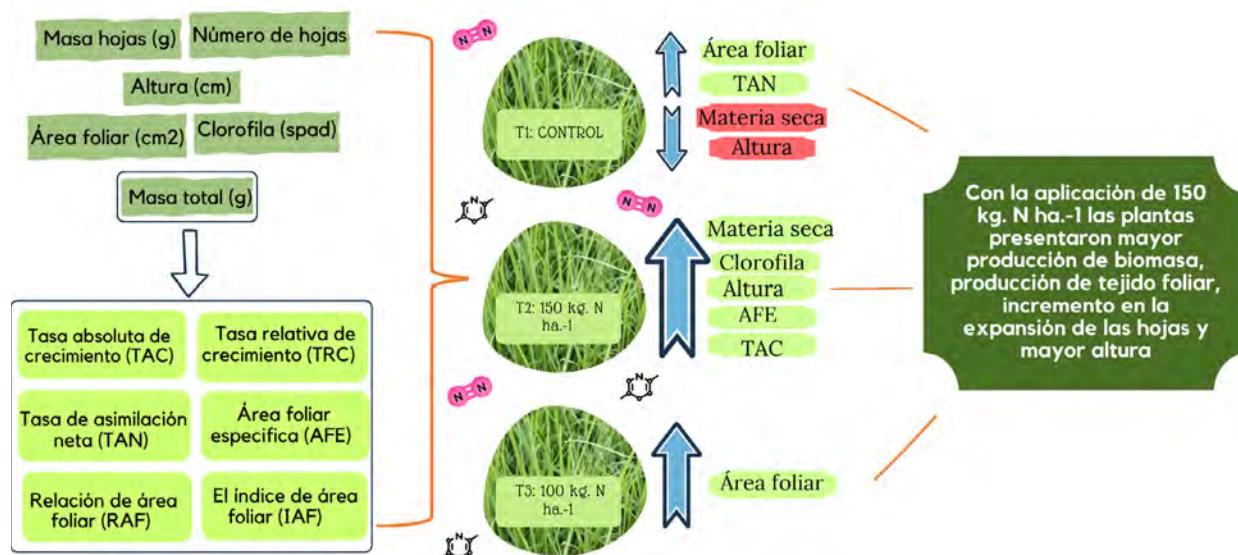
Methodology: a control treatment without application of any source of N (T0) was evaluated, a dosage of 100 kg. N ha⁻¹ (T1) and a dosage of 150 kg. N ha⁻¹ (T2). The fertilization plan was programmed

for 42-day defoliation with a residual height of 10cm. Subsequently, the growth of kikuyu grass was evaluated with a seven-day frequency based on the analysis of dry matter, chlorophyll content, stomatal conductance, number of leaves, height, leaf area, and dry matter of leaves and stems. Growth rates were calculated from the dry matter of the forage: Absolute Growth Rate (AGR), Relative Growth Rate (RGR), Net Assimilation Rate (NAR), Specific Leaf Area (SLA), Leaf Area Ratio (LAR), and Leaf Area Index (LAI). Analysis of repeated measures was carried out to determine the effect per sampling point (HDDs) in a completely randomized arrangement.

Results and conclusions: with the application of 150 kg. N ha⁻¹ (T2) and 208.6 HDDs (42 days), plants showed higher growth rate, leaf tissue production, leaf area, and greater height.

Keywords: fertilization, forage, grass, growth rate

■ RESUMEN GRÁFICO



Esquema descriptivo de metodología, resultados y conclusión

Fuente: autores.

1 INTRODUCCIÓN

El pasto kikuyo *Cenchrus clandestinus* (*Hochst. ex Chiov.*) Morrone (Tropicos Name Search, 2010; Acero-Camelo *et al.*, 2020), es una especie forrajera Africana nativa de zonas ubicadas entre 1950 a 2700 msnm (Arango *et al.*, 2019; Fonseca *et al.*, 2020) que se adapta desde 800-3500 msnm en Colombia (Irving, 2015). Se reportan varios cultivares y ecotipos desarrollados por presión ambiental, con poca

diferencia fenotípica, (Lowe *et al.*, 2010). Sus cualidades nutricionales, resistencia al pastoreo, sistema de raíces desarrollado, tolerancia a la sequía (Neal, 2011), calor y salinidad del suelo (Muscolo *et al.*, 2004), hacen de esta una planta útil en sistemas de pastoreo intensivos.

La capacidad productiva de los forrajes está limitada por el ecotipo cultivado, las condiciones ambientales y el manejo;

sin embargo, es posible manipular la respuesta del pasto a partir de la aplicación de nutrientes como el Nitrógeno (N) y la frecuencia de defoliación (Escobar et al., 2020; Medeiros *et al.*, 2021; Schmitt *et al.*, 2019). Definir tiempos de corte precisos es difícil, ya que la luz y la temperatura son factores que influyen en la asignación de la biomasa (Perera y Cullen, 2020). Por ello, se ha sugerido la evaluación de los parámetros de crecimiento: Tasa de Asimilación Neta (TAN), Área Foliar Específica (AFE), Relación de Área Foliar (RAF), Índice de Área Foliar (IAF), Tasa Absoluta de Crecimiento (TAC) y Tasa Relativa de Crecimiento (TRC), que deben ser expresados en función de la acumulación de Grados Día de Crecimiento Acumulados (GDCA), los cuales corresponden a la acumulación de temperaturas medias diarias por sobre la temperatura base de desarrollo de las especies de cultivo, durante su temporada de crecimiento, a fin de determinar el límite de rebrote en sis-

temas de siembra intermitente (Sbrissia, 2018; Vistoso y Martínez, 2021).

Debido a que se presentan diferentes hallazgos en la respuesta agronómica del pasto kikuyo por la zona de establecimiento del cultivo y por el nivel de N aplicado en la fertilización, se reduce la posibilidad de establecer comportamientos productivos generales. Además, la sub fertilización de N puede incrementar el material en senescencia y cambiar la proporción de brotes a raíces (Irving, 2015), mientras que cantidades altas pueden contribuir a pérdidas de N por volatilización y por lixiviación, favoreciendo la eutrofización del agua, lo que acelera el proceso de desnitrificación en el que se produce N_2O , conocido por su efecto en el calentamiento global (Fonseca *et al.*, 2019b). Por lo anterior, en este estudio se evaluó la dinámica de crecimiento de pasto kikuyo con diferentes niveles de fertilización nitrogenada sobre los 2900 m.s.n.m.

MATERIALES Y MÉTODOS 2

El estudio se realizó en Región Andina colombiana del departamento de Boyacá, en el municipio de Tunja, vereda la cascada sobre los 2900 m.s.n.m. en zona con un clima templado ecuatorial, temperatura promedio de 13 ° C, humedad relativa 78 %, radiación entre 9 y 10, relieve de planicie y suelo franco arcilloso

con las siguientes características: pH 5.4, M.O.% 4.9, C.I.C. 17.84 y 1.3 C.E. dS. m.⁻¹. Las unidades experimentales correspondieron a parcelas de 3 x 4 m² de pasto kikuyo en monocultivo establecidas durante seis meses, con distancia intersiembra de 0.50m, con cuatro repeticiones por tratamiento. Se evaluó en un diseño com-

pletamente al azar cantidades de urea utilizadas comúnmente en la zona de la siguiente manera: un tratamiento control en el que no se aplicó ninguna fuente de N (T0); una dosificación de 217,4 kg de urea para aportar 100 kg. N ha.⁻¹(T1), una dosificación de 326 kg de urea para aportar 150 kg. N ha.⁻¹ (T2). Los demás minerales se aplicaron según los requerimientos (PO₄ 69, K 90 y Mg 25 kg. ha.⁻¹ año⁻¹) (Bernal y Espinoza, 2003).

El plan de fertilización se programó para defoliaciones de 42 días durante dos ciclos de corte con altura residual de 10 cm. Posterior al corte de defoliación, se evaluó con siete días de frecuencia el crecimiento del pasto kikuyo, a partir del análisis de la materia seca total, materia seca acu-

mulada en hojas, número de hojas, altura, conductancia estomática y contenido de clorofila. La materia seca total y de hojas se determinó a partir de muestras dejadas a 60°C durante 48 h hasta alcanzar un peso constante (Fonseca *et al.*, 2019a). El área foliar se determinó a partir de una muestra de 100 g. por unidad experimental, de éstas muestras se separaron hojas de tallos y las hojas se colocaron sobre un soporte blanco con adhesivo para toma fotográfica, las imágenes fueron importadas al programa Imagen versión 7 ® y se determinó el área foliar a partir de un valor de área conocido, los resultados se realizaron por planta. A partir de la materia seca se calculó: TAC, TRC, TAN, AFE, RAF y el IAF (Tabla 1).

■ Tabla 1. Descripción y fórmulas de las tasas de crecimiento evaluadas

Índice	Descripción	Fórmula abreviada	Unidades
TAC	Tasa Absoluta de Crecimiento	dW/dt	g. d. ⁻¹
TRC	Tasa Relativa de Crecimiento	(1/W)(dW/dt)	g. g. ⁻¹ d. ⁻¹
IAF	Índice de Área Foliar	L _A /P	Adimensional
TAN	Tasa de Asimilación Neta	(1/L _A)(dW/dt)	g. cm. ⁻² d. ⁻¹
AFE	Área Foliar Específica	L _A /LW	cm. ² g. ⁻¹
RAF	Relación de Área Foliar	L _A /W	cm. ² g. ⁻¹

W: masa seca, t: tiempo, L_A: área foliar, P: área del suelo, LW: masa seca foliar

Fuente: Carranza *et al.* (2009).

Durante todo el ensayo se registró la temperatura diaria del ambiente con un datalogger y los datos se expresaron en Grados Día de Crecimiento (GDC), utili-

zando 8°C como temperatura base, siendo calculados con la Ecuación 1 (Méndez-Soto, 2015):

(Ecuación 1)

$$GDC: \frac{Tm + TM}{2} - Tb$$

Donde: **Tm**: temperatura en °C mínima;
TM: temperatura en °C máxima;
Tb: temperatura en base.

Los GDCA, se sumaron hasta los días de defoliación establecidos para el estu-

dio, resultando en los GDCA, como se puede ver en la Tabla 2, y se calcularon con la Ecuación 2 (Méndez-Soto, 2015):

(Ecuación 2)

$$GDCA: \sum GDC 1 \rightarrow n$$

Donde: **GDC** es el Grado Día de Crecimiento diario. **n**: número de días del periodo evaluado.

■ **Tabla 2.** Grados día de crecimiento Acumulados (GDCA) medidos para cada día de defoliación del pasto kikuyo

DÍA	GDCA (C)
7	40,0
14	76,5
21	113,0
28	144,5
35	174,5
42	208,5

Fuente: autores.

El riego se aplicó por aspersión, calculando la lámina de riego de acuerdo con Álvarez *et al.* (2010). En promedio se aplicaron 18 litros de agua por unidad experimental.

Con los datos obtenidos se determinaron los modelos estadísticos con mayor ajuste para cada variable, se realizó un análisis de varianza, donde se presentaron diferencias significativas, se aplicó la

prueba de Tukey para detectar diferencias entre los tratamientos ($p<0.05$). Los índices de crecimiento fueron graficados en relación con el tiempo fisiológico expresado en GDCA. El efecto de los puntos de muestreo GDCA se determinó a través de un análisis de medidas repetidas en el tiempo. Se utilizó el programa estadístico SPSS versión 19.

3

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Crecimiento del forraje

Las áreas foliares fueron estadísticamente diferentes entre los puntos de evaluación expresados en GDCA ($p<0,05$) con la aplicación de todos los niveles de fertilización nitrogenada destacándose el tratamiento en el que se aplicó 150 kg. N ha.⁻¹ ($p<0,05$). La interacción entre los GDCA y el área foliar ($p<0,05$) tuvo un tamaño de efecto alto (0,987). También se observó que el número de hojas del forraje difirió estadísticamente cuando las plantas acumularon 175 y 209 GDCA ($p<0,05$), pero la

interacción entre los GDCA y el desarrollo de las hojas ($p<0,05$) tuvo un efecto bajo (0,626). La acumulación de masa total (g) en el forraje presentó marcada diferencia estadística a partir de 145 GDCA ($p<0,05$), esto mismo se observó con la acumulación de masa de las hojas ($p<0,05$). La altura del forraje cambió estadísticamente con los GDCA ($p<0,05$) presentándose interacción significativa entre GDCA y altura con tamaño de efecto alto (1). Por el contrario, el efecto de GDCA en relación con la masa total y masa de hojas fue bajo (0,178 y 0,318 respectivamente) (Tabla 3).

■ **Tabla 3.** Análisis de medidas repetidas

Variable	P valor	Eta parcial al cuadrado	Potencia Green-house-Geisser
Área foliar	< 0,001	1	1
Área foliar*GDCA	< 0,001	0,987	1
Número de hojas	< 0,001	0,935	1
Número de hojas*GDCA	0,079	0,443	0,626
Masa total	< 0,001	0,947	1
Masa total*GDCA	0,668	0,178	0,178
Masa hojas	< 0,001	0,950	1
Masa hojas*GDCA	0,369	0,280	0,318
Altura	< 0,001	0,993	1
Altura*GDCA	< 0,001	0,959	1

Fuente: autores.

Se encontró que el pasto kikuyo con defoliación a los 42 días presentó un crecimiento de ajuste exponencial según la respuesta de las variables evaluadas (Tabla 4), lo que se relaciona con la primera fase de crecimiento que según el modelo sigmoidal de Brougham para forrajes, ocurre cuando las plantas presentan la mayor

tasa de crecimiento celular en las raíces y en los puntos meristemáticos (Da-Silva *et al.*, 2015). En forrajes de pastoreo resulta difícil ver esta tendencia porque la altura de defoliación ocurre antes de la madurez del cultivo, debido a la relación inversa entre la calidad nutricional del forraje y la edad del rebrote (Rodríguez *et al.*, 2019).

■ Tabla 4. Ecuaciones de regresión que se ajustaron a las variables de crecimiento de pasto kikuyo fertilizado con diferente dosis de nitrógeno a intervalos de corte de 42 días

Parámetro	Tratamiento (kg N ha. ⁻¹)	Modelo	R ²
Masa total (g)	0	$Y = 7.6721^{0.0042x}$	0.98
	100	$Y = 10.8012^{0.0037x}$	0.98
	150	$Y = 11.1386^{0.0039x}$	0.99
Masa hojas (g)	0	$Y = 4.6058^{0.0042x}$	0.98
	100	$Y = 6.5278^{0.0037x}$	0.98
	150	$Y = 7.3526^{0.0039x}$	0.99
Número de hojas	0	$Y = 2.1634^{0.0038x}$	0.99
	100	$Y = 2.2628^{0.0049x}$	0.99
	150	$Y = 2.5834^{0.0047x}$	0.97
Altura (cm)	0	$Y = 9.9138^{0.0034x}$	0.98
	100	$Y = 10.1071^{0.0058x}$	0.98
	150	$Y = 11.9598^{0.0058x}$	0.95
Clorofila (spad)	0	$Y = 8.5753^{0.0058x}$	0.99
	100	$Y = 10.0493^{0.0067x}$	0.98
	150	$Y = 10.8934^{0.0066x}$	0.98
Área foliar (cm²)	0	$Y = 2.1406^{0.0158x}$	0.99
	100	$Y = 7.0545^{0.0130x}$	0.97
	150	$Y = 8.7627^{0.0127x}$	0.97

Fuente: autores.

En este estudio, las plantas alcanzaron las mejores respuestas con la aplicación de 150 kg. N ha.⁻¹ en promedio 24.3 ± 0.8 g de MS planta, presentándose diferencias con la aplicación de 100 kg. N ha.⁻¹ con el que se obtuvo 22.5 ± 0.9 y con el forraje sin aplicación de urea con 17.9 ± 0.4 g (p<0.05) (Figura 1).

En promedio se alcanzó 2200 kg. MS ha.⁻¹ con 150 kg. N ha.⁻¹, respuesta productiva mayor a praderas con 100 kg. N ha.⁻¹ (1900

kg. MS ha.⁻¹) y sin fertilizar (1100 kg. MS ha.⁻¹) (p<0.05). Con la aplicación de 100 kg. N ha.⁻¹ se reporta la producción de 2600 kg. MS ha.⁻¹ (García *et al.*, 2014), 2000 kg. MS ha.⁻¹ y con 150 kg. N ha.⁻¹ entre 2000 y 2500 kg. N ha.⁻¹ (Acero *et al.*, 2020). Estos hallazgos son similares a lo observado en este estudio y coincide con lo encontrado en otras especies de gramíneas (Rushing *et al.*, 2019; Arteaga *et al.*, 2019; Benalcázar *et al.*, 2021).

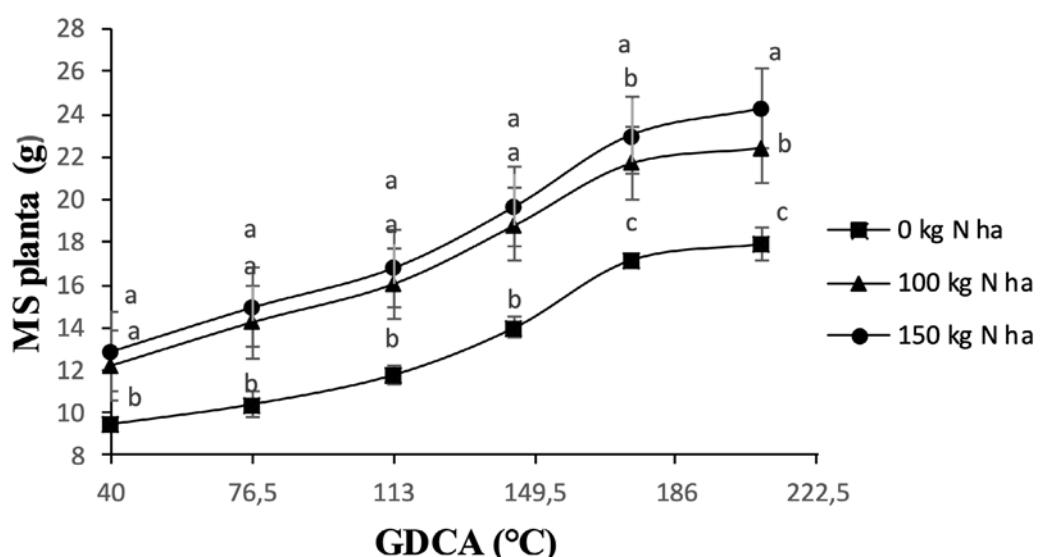


Figura 1. Comportamiento de la masa seca total del pasto kikuyo fertilizado con diferentes niveles de nitrógeno 0 (T0), 100 (T1) y 150 kg. N ha.⁻¹ (T2), en función de los grados de crecimiento acumulados después del corte

Fuente: autores.

Área foliar, número de hojas y altura

El área foliar del pasto kikuyo difirió significativamente entre tratamientos (p< 0.05) a partir de 76.5 GDCA (14 días)

hasta 208,5 GDCA (42 días) (Figura 2). La mayor área foliar se obtuvo en el T2 con 120 cm^2 , seguido del T1 con 100 cm^2 y T0 con 60 cm^2 , valores que corresponden al punto óptimo de corte (Acero-Camelo, 2019). Los valores más altos que se pue-

den lograr en área foliar sin la aplicación de N y con 100 y 150 kg. N ha.⁻¹ según las curvas de predicción son 165.4 cm.² (T2), 150.6 cm.² (T1) y 149.05 cm.² (T0) respec-

tivamente (datos no mostrados), valores que corresponden a los puntos de declive de los modelos con mayor ajuste (r^2) (Fonseca *et al.*, 2019a).

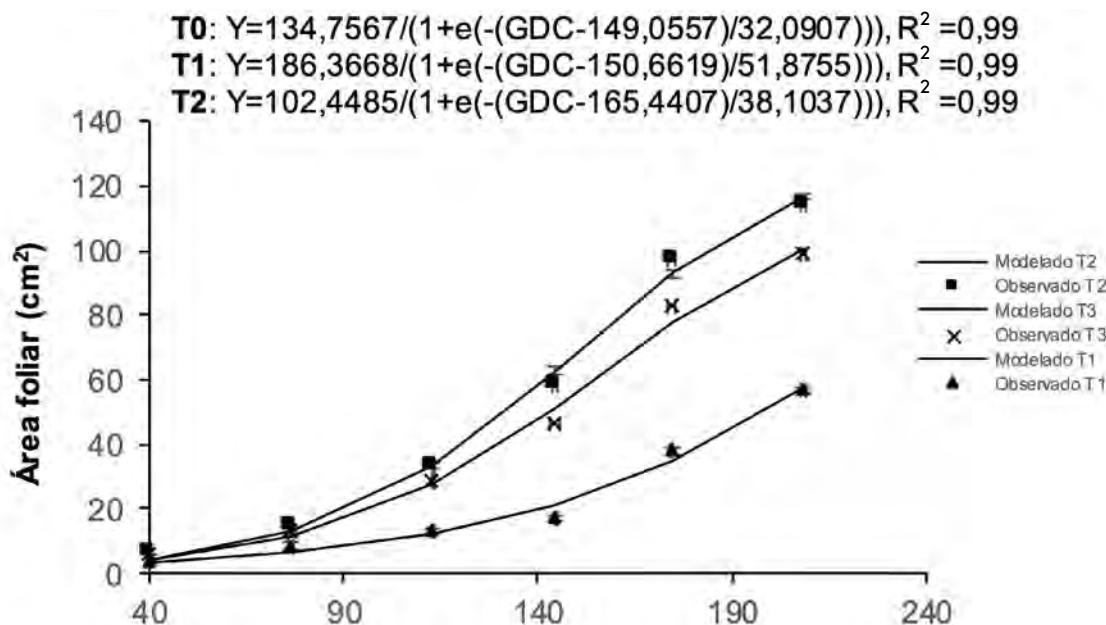


Figura 2. Comportamiento del área foliar de pasto kikuyo fertilizado con diferentes niveles de nitrógeno 0 (T1), 100 (T2) y 150 kg. N ha.⁻¹ (T3), en función de los grados acumulados después del corte

Fuente: autores.

El área foliar del pasto kikuyo difirió significativamente entre tratamientos ($p < 0.05$) luego de 76.5 GDCA (14 días) ya que de acuerdo a Da-Silva *et al.* (2015), en la primera fase (0 a 14 días), la producción de forraje ocurre lentamente, asociado al bajo IAF residual remanente después del pastoreo y por el bajo aporte de las hojas no removidas, ya que en esta fase existe alta dependencia de las reservas orgánicas y del área foliar remanente. Luego de los 14 días la planta extrae en mayor me-

dida el N disponible en el suelo, lo que influye en el crecimiento, concordando con los resultados obtenidos a partir de 14 días hasta 208,5 GDCA a los 42 días (Figura 2).

El incremento en el área foliar se relaciona con el aporte de N debido a que favorece el crecimiento de los brotes y el desarrollo de hojas más anchas por un incremento en la proporción de células mesófilas, lo que da lugar a un mayor índice de área foliar y

área foliar específica (Irving, 2015; Villegas *et al.*, 2019; Dídimos *et al.*, 2019).

El número de hojas influye en el área foliar, en este estudio aunque no hubo diferencias significativas entre tratamientos para esta variable, el área de captación de luz incrementó con el nivel de N aplicado por la mayor altura alcanzada con 150 kg. N ha.⁻¹ (Figura 3). Estos resultados son su-

periores a lo reportado con esta misma dosis de N con la cual se ha observado hasta 23.9 cm de altura sin disturbar (Acero *et al.*, 2020; Avellaneda *et al.*, 2020). Sin embargo, en este ensayo la menor altura alcanzada puede deberse a que este forraje cultivado a mayores altitudes crece lentamente y acumula menos nutrientes independientemente del número de hojas por macollo (Escobar *et al.*, 2020; García *et al.*, 2014).

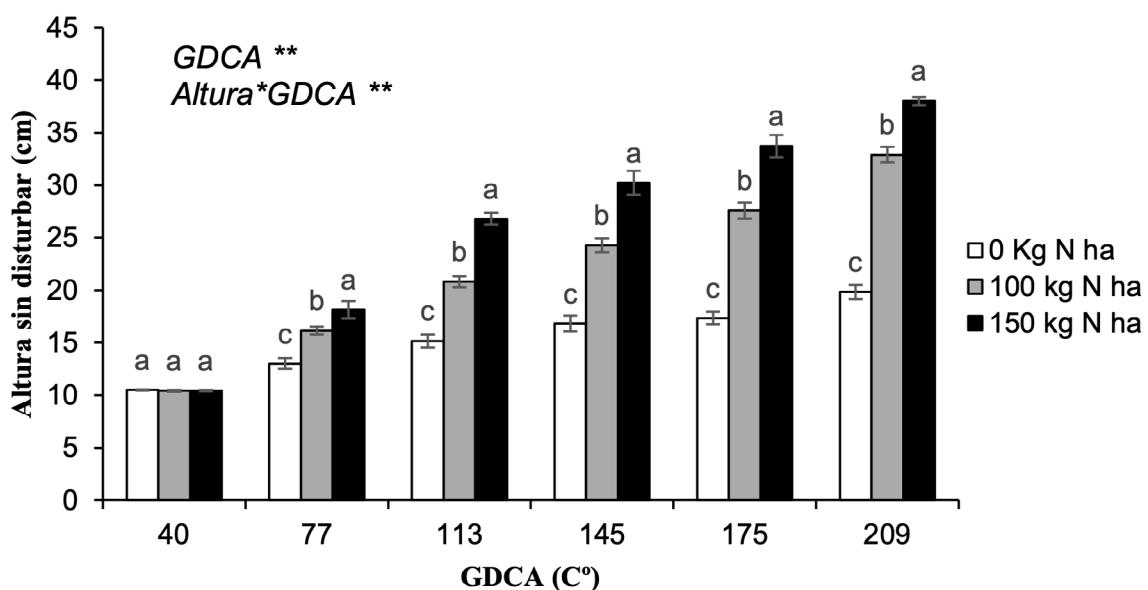


Figura 3. Altura de *Cenchrus clandestinus* fertilizado con diferentes niveles de nitrógeno 0 kg. N ha.⁻¹, 100 kg. N ha.⁻¹ y 150 kg. N ha.⁻¹. ** p<0,01

Fuente: autores.

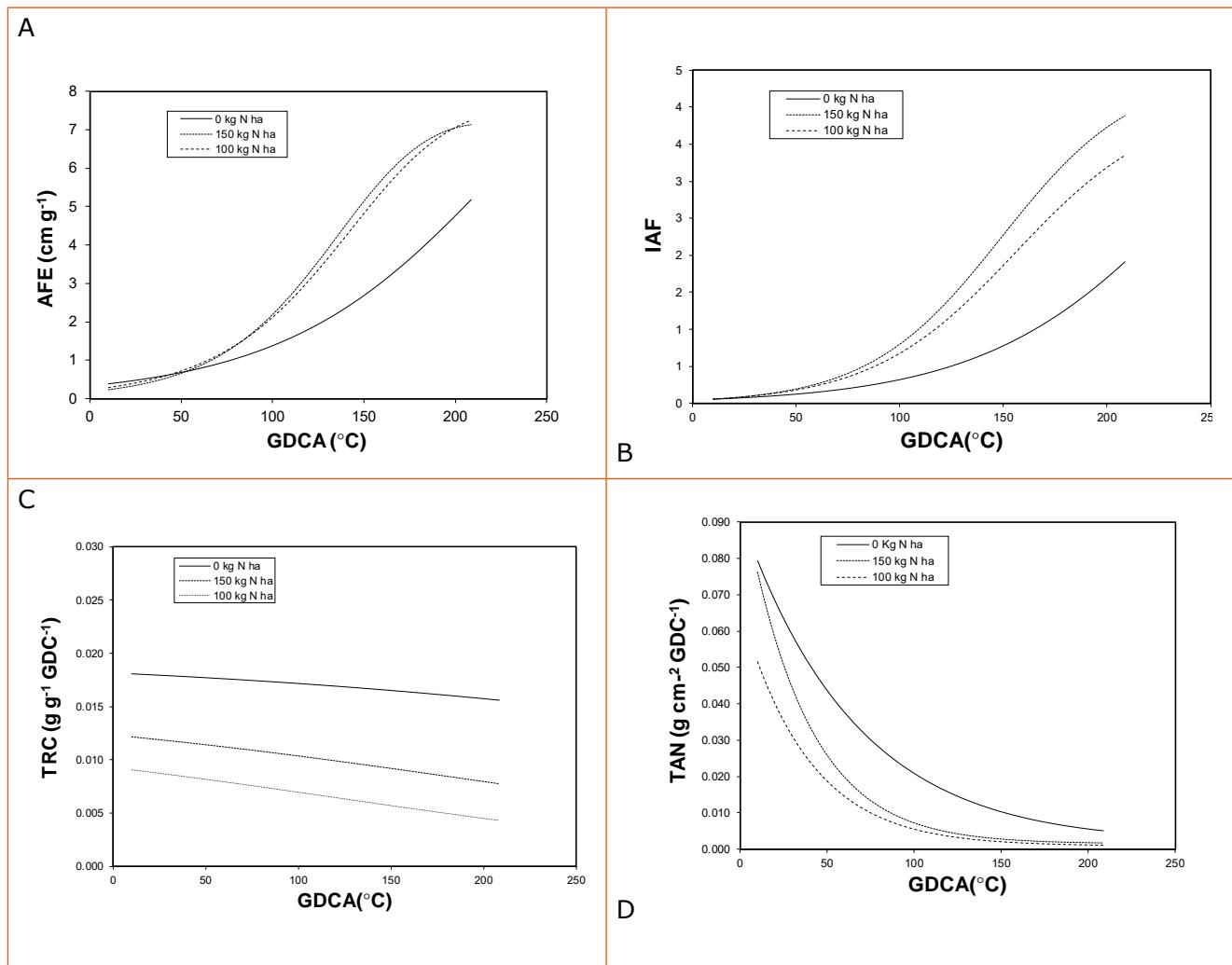
Durante el crecimiento de *pasto kikuyo* se ha observado una relación hoja tallo de 0.5 (Acero *et al.*, 2020). Pero, en condiciones de competencia por luz la proporción y longitud de los tallos incrementa respecto al número de hojas como una forma

de optimizar la captación de luz, patrón de crecimiento que favorece la acumulación de material muerto en la base de las plantas cuando se supera el índice crítico de área foliar (Da-Silva *et al.*, 2004; Carnovali, 2021). Este comportamiento es mo-

dulado principalmente por la altura de pastoreo, de modo que defoliación a 10 cm con frecuencias de corte a 208.5 GDCA parece mantener un equilibrio entre el desarrollo de las hojas y tallos, conforme se observó con el comportamiento de las tasas de crecimiento (Figura 4).

Tasas de crecimiento

El IAF, AFE y la RAF presentaron una curva sigmoidal (Figura 5), estas tasas de crecimiento representan el incremento del tamaño de la hoja respecto al espacio que ocupan, la masa seca de las hojas y la masa seca total respectivamente (Carranza *et al.*, 2009).



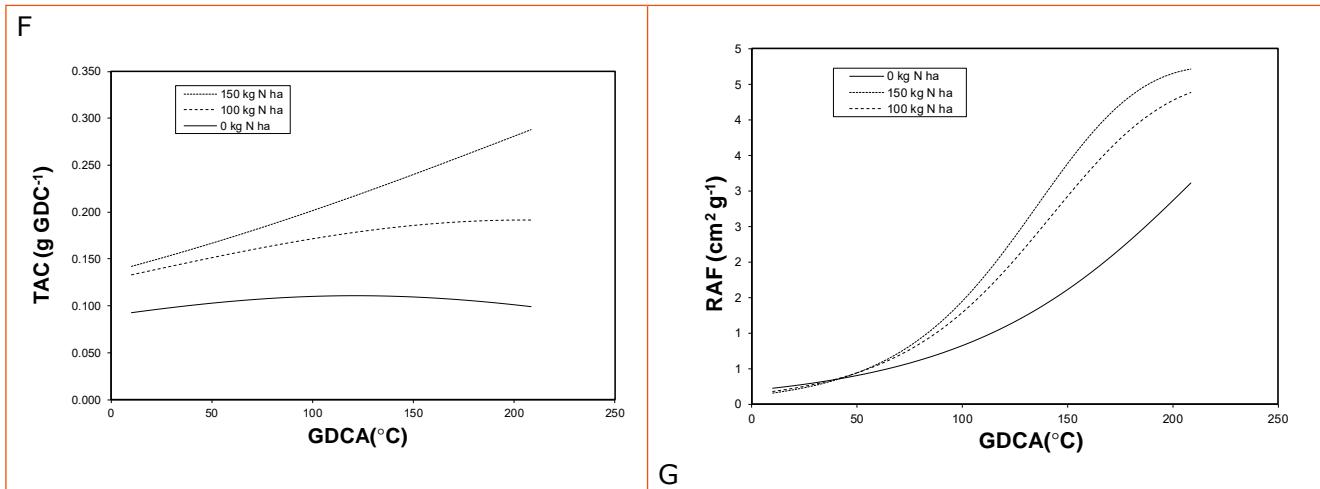


Figura 4. Tasas e índices de crecimiento de pasto kikuyu sembrado con diferentes niveles de fertilización nitrogenada 0, 150, 100 kg. N ha.⁻¹, tasa absoluta de crecimiento (TAC), tasa relativa de crecimiento (TRC), índice de área foliar (IAF), tasa de asimilación neta (TAN), área foliar específica (AFE), relación de área foliar (RAF)

Fuente: autores.

El AFE disminuye al incrementar la edad de rebrote y se relaciona con la dureza y grosor de las hojas (Garay *et al.*, 2019). En este estudio AFE mantuvo un comportamiento similar entre tratamientos, pero los valores más altos se observaron con 150 kg. N ha.⁻¹, lo que muestra que este nutriente favorece la acumulación de materia seca del forraje y el crecimiento de hojas tiernas. Igualmente, hay especial atención en el IAF de las pasturas, debido a que valores altos se relacionan con una mayor área de captación de luz en el cultivo, condición que se presenta porque el desarrollo de los macollos y el tamaño y cantidad de sus hojas se encuentran en un punto de máximo crecimiento, lo que

sucede al final de la fase exponencial del modelo sigmoidal de Brougham (Da-Silva *et al.*, 2015).

Existe una relación inversa entre la intensidad de defoliación y el IAF, reportándose valores de 2.7 y 2.6 con defoliaciones a 10 cm. y 7.6 cm. respectivamente (Medeiros *et al.*, 2021) pero, en este ensayo a defoliación de 10 cm se observaron valores más altos con variación significativa ($p<0.05$), según el nivel de N aplicado. Lo que muestra que el N disponible para la planta favorece el incremento del tamaño de las hojas.

En general, a menor intensidad de defoliación se obtiene mayor cantidad de forraje, por ello, intensidades superiores

al 50% no son recomendables para maximizar la acumulación de forraje (Medeiros *et al.*, 2021), aunque se aceptan rangos de defoliación entre 40 y 60% de la altura inicial para garantizar la recuperación de la pradera (Da-Silva *et al.*, 2015). El mecanismo de recuperación de IAF en defoliaciones superiores al 50% consiste en un incremento en la densidad de población de macollos mientras que en defoliación del 50% la recuperación se realiza a través de incremento en el área foliar del macollo (Medeiros *et al.*, 2021), tal como se observó en este estudio. Lo anterior a su vez favorece la masa seca acumulada en relación con la materia seca residual, razón por la que la TRC disminuyó con el tiempo, principalmente en la mayor dosis de N, lo que corresponde a un comportamiento normal (Carranza *et al.*, 2009), debido a que dicha dosis generó la mayor materia seca.

La TAN disminuyó con el crecimiento de las plantas, observándose el mayor valor con la menor dosis de N, esto se explica por el crecimiento erecto del forraje en el cual a medida que se desarrollan hojas nuevas hay sombreado por sobreposición, lo que disminuye la tasa de asimilación neta (Carranza *et al.*, 2009), aunque

también puede ser porque en los tratamientos con N se estimuló mayor incremento del área foliar con relación a la producción de materia seca. La TAC aumentó con el tiempo y fue mayor con la aplicación de 150 kg. N ha.⁻¹. Se considera que con esta dosis de N se acumula materia seca a mayor velocidad (Huamán y Vásquez, 2019; Lascano *et al.*, 2019; Fulkerson y Jennings, 2020; Ramírez *et al.*, 2020).

Conductancia estomática y clorofila

Hubo diferencia significativa en el valor de conductancia estomática inicial (40 GDCA) y los valores observados con mayor grado de desarrollo de las plantas (113 GDCA, 114,5 GDCA y 174,5 GDCA) ($p<0,05$). La conductancia estomática cambio significativamente ($p<0,05$) en plantas fertilizadas con 150 kg. N ha.⁻¹ respecto a plantas sin fertilizar (Figura 5A). Este comportamiento se relaciona con un incremento en la capacidad fotosintética de las hojas por efecto del N aplicado y por la regulación del agua en la apertura y cierre de las estomas, respuesta que coincide con lo publicado por Acero *et al.* (2020).

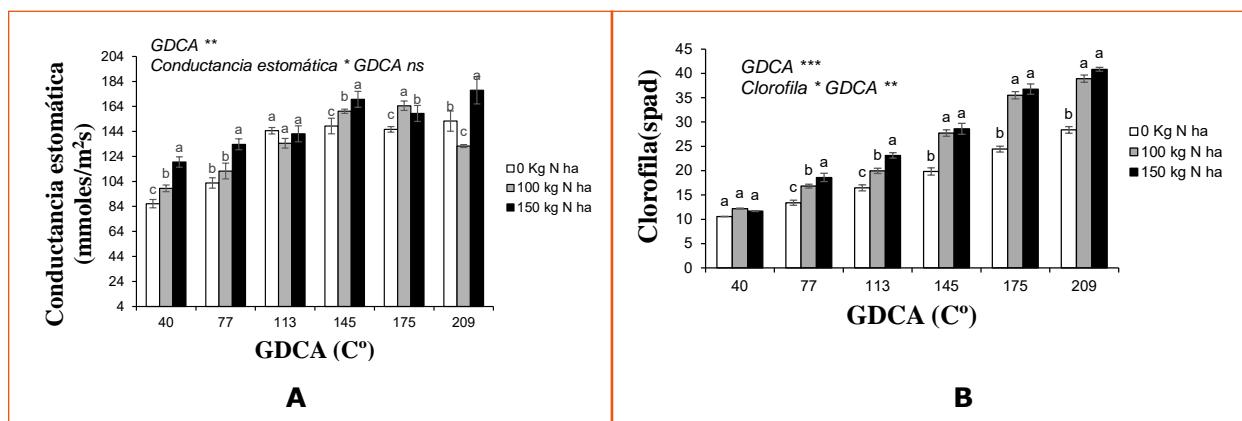


Figura 5. Comportamiento de la conductancia estomática (A) y del índice de clorofila (B) en pasto kikuyo sometido a diferentes dosis de N. Barras verticales en cada columna indican el error estándar ($n=4$). ns: interacción no significativa. ** $p<0,01$ *** $p<0,001$

Fuente: autores.

El valor de clorofila fue significativamente diferente durante el desarrollo del forraje en todos los GDCA acumulados ($p<0,05$), presentándose interacción significativa entre clorofila y GDCA con un tamaño de efecto alto (0,990). El nivel de N aplicado también influyó significativamente ($p<0,05$) en el contenido de clorofila de las hojas, los valores más altos se observaron con la aplicación de 150 kg. N ha.⁻¹ (Figura 5B). Este resultado pudo deberse a

que cada molécula de clorofila está compuesta por 4 átomos de N, por tanto, a mayor N es de esperarse mayor contenido de clorofila (Irving, 2015). Esto puede relacionarse con mayor captación de luz por el incremento en el contenido de los pigmentos de las hojas lo que favorece la capacidad fotosintética y la fijación de carbono en las hojas, logrando un mayor incremento en la acumulación de materia seca y en la altura de las plantas de kikuyo.

4 CONCLUSIONES

En praderas de pasto kikuyo cultivadas a 2900 m.s.n.m. con la aplicación de 150 kg. N ha.⁻¹ se presentó un crecimiento

exponencial, obteniéndose las mejores tasas de crecimiento a los 208.5 GDCA (42 días). Basados en las curvas de regresión

que se ajustaron un modelo de crecimiento sigmoidal ($R^2=0.99$), la mayor producción de forraje con la aplicación de 150 kg. N ha.⁻¹ se presentó por incremento en el área foliar pudiéndose obtener hasta 165.4 cm.². Mayor captación de luz está relacionada con incremento en la capacidad

para fijar carbono en tejido vegetal, lo que favorece los índices de área foliar y área foliar específica. La mayor disponibilidad de N incrementó la altura de la pradera en 38 ± 0.9 cm y la producción de forraje que en promedio fue de 2200 kg.MS ha.⁻¹

CONTRIBUCIÓN DE LA AUTORÍA ■

Dania Fonseca-López: adquisición de recursos, metodología, investigación, conceptualización. **Carlos Eduardo Rodríguez-Molano:** escritura, revisión y edición. **Nelson Vivas-Quilla:** logística, revisión y edición. **Pedro Almanza-Merchán:** análisis de datos. **Helber Balaguera-López:** administrador del proyecto, supervisión.

AGRADECIMIENTOS ■

Los autores expresamos agradecimiento al Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación convocatoria 779/2017, a la Gobernación del departamento de Boyacá y a la Universidad del Cauca ID 5150, a la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia UPTC y al Grupo de Investigación en Bioquímica y Nutrición Animal GIBNA.

LITERATURA CITADA ■

Acero-Camelo, A. (2019). *Aspectos ambientales y de manejo que determinan el crecimiento del kikuyo (Cenchrus clandestinus Hochst. ex Chiov. Morrone) en la Provincia de Ubaté*. [Tesis para optar al título de Doctor en ciencias en Producción Animal]. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.

Acero-Camelo, A., Molina, E., Parra-Coronado, A., Fischer, G. y Carulla-Foranguera, J.E. (2021). Base growth temperature and phyllochron for kikuyu grass (*Cenchrus clandestinus*; Poaceae). *Acta Biol Colomb*, 26(2), 160-169. <http://dx.doi.org/10.15446/abc.v26n2.83199>

Acero-Camelo, A., Pabón, M. L., Fischer, G., and Carulla, J. E. (2020). Optimum harvest time for Kikuyo grass (*Cenchrus clandestinum*) according to the number of leaves per tiller and nitrogen fertilization. *Revista Facultad Nacional de Agronomía*. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v73n3.82257>

Álvarez-Herrera, J. G., Balaguera-López, H. E. y Pardo, E. C. (2010). Efecto de la aplicación de diversas láminas y frecuencias de riego en la propagación del romero (*Rosmarinus officinalis* L.). *Revista Ingeniería e Investigación*, 30(1), 86–90. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.v30n1.15213>

Arango-Gaviria, J., Echeverri-Zuluaga, J. y López, A. (2019). Diversidad del pasto Kikuyo (*Cenchrus clandestinum*): Una revisión. *Respuestas*, 24(2), 82-90. <https://doi.org/10.22463/0122820X.1834>

Arteaga, D. E. V., García, G. a. C., Cedeño-García, G., Chávez, J. E. C. y Lugo, M. T. (2019). Eficiencia agronómica de nitrógeno y producción de *Cynodon plectostachyus* (K. Schum.) Pilg. en función de dos frecuencias de corte. *Chilean Journal of Agricultural & Animal Science*, 35(3). <https://doi.org/10.4067/s0719-38902019005000405>

Avellaneda, Y., Muñoz, E. y Vargas, D. J. (2020). Efecto de la edad de rebrote sobre el desarrollo morfológico y la composición química del pasto kikuyo (*Cenchrus clandestinum*) en el trópico alto colombiano. *CES Medicina Veteri-*

naria Y Zootecnia, 15(2), 23–37. <https://doi.org/10.21615/cesmvz.15.2.2>

Benalcázar-Carranza, B.P., López-Caiza, V.C., Gutiérrez-León, F.A., Alvarado-Ochoa, S., and, Portilla-Narváez, A.R. (2021). Effect of nitrogen fertilization on the growth of five perennial pastures. *Ecuador, Pastos y Forrajes*, 44, eE05.

Bernal, J. B., y Espinosa, J. (2003). *Manual de nutrición y fertilización de pastos*. International Plant Nutrition Institute (IPNI).

Carnevalli, R. A., De Souza Congio, G. F., Sbrissia, A. F., and Da Silva, S. C. (2021). Growth of *Megathyrsus maximus* cv. Mombaça as affected by grazing strategies and environmental seasonality. II. Dynamics of herbage accumulation. *Crop & Pasture Science*, 72(1), 66. <https://doi.org/10.1071/cp20199>

Carranza, C. F. C., Lanchero, O., Miranda, D., y Chávez, B. (2009). Análisis del crecimiento de lechuga (*Lactuca sativa* L.) “Batavia” cultivada en un suelo salino de la Sabana de Bogotá. *Agronomía Colombiana*, 27(1), 41–48. <https://www.redalyc.org/pdf/1803/180314730006.pdf>

Da Silva, S. C., Sbrissia, A. F., and Pereira, L. V. (2015). Ecophysiology of C4 Forage Grasses—Understanding Plant Growth for Optimising Their Use and Management. *Agriculture*, 5(3), 598–625. <https://doi.org/10.3390/agriculture5030598>

Dídim-Vera, A., Cedeño-García, G., Cedeño-García, G., Cargua-Chávez, J. y Garay-Lugo, M. (2019). Eficiencia agronómica de nitrógeno y producción de *Cynodon plectostachyus* (K. Schum.) Pilg. en función de dos frecuencias de corte. *Chilean journal of agricultural & animal sciences*, 35(3), 251-260. <https://dx.doi.org/10.4067/S0719-38902019005000405>

Escobar-Charry, M., Cárdenas-Rocha, E.A. y Carulla-Fornaguera, J.E. (2020). Effect of altitude and defoliation frequency in the quality and growth of Kikuyu grass (*Cenchrus clandestinus*). *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 73(1), 9121-9130. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v73n1.77330>

Fonseca-López, D., Bohórquez-Masmela, I. A., Molano, C. E. R., y Quila, N. J. V. (2020). Efecto del periodo de recuperación en la producción y calidad nutricional de algunas especies forrajeras. *Biotecnología en el sector agropecuario y agroindustrial*, 18(2), 135. [https://doi.org/10.18684/bsaa\(18\)135-144](https://doi.org/10.18684/bsaa(18)135-144)

Fonseca-López, D., Monroy-Fonseca, L. y Molano, C. E. R. (2019a). Efecto del método de extracción del almidón de Canna indica L. sobre sus propiedades físico-químicas. *Revista Lasallista de Investigación*. <https://doi.org/10.22507/rli.v16n2a4>

Fonseca-López, D., Quila, N. J. V. y Balaguera-López, H. E. (2019b). Técnicas aplicadas en la investigación agrícola para cuantificar la fijación de nitróge-

no: una revisión sistemática. *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 21(1), 1-19. https://doi.org/10.21930/rcta.vol21_num1_art:1342

Fulkerson, W. J., and Jennings, N. R. (2020). Urea applied as a foliar spray or in granular form to subtropical dairy pastures of kikuyu (*Cenchrus clandestinum*) and Italian ryegrass (*Lolium multiflorum*) in eastern Australia. *Crop & Pasture Science*, 71(12), 1067. <https://doi.org/10.1071/cp20193>

Garay-Martínez, S., Joaquín-Cancino, B., Estrada-Drouaillet, J.C., Martínez-González, A.G., Limas-Martínez, J., Hernández-Meléndez, A.R. (2019). Producción y cambios morfológicos de *Pennisetum ciliare* cv. H-17 en función de la edad de rebrote y altura de pradera. *Acta universitaria*, 29, e2306, 2019. <https://doi.org/10.15174/au.2019.2306>

García, S. C., Islam, M. S., Clark, C. R., and Martin, P. M. (2014). Kikuyu-based pasture for dairy production: a review. *Crop & Pasture Science*, 65(8), 787. <https://doi.org/10.1071/cp13414>

Huaman, L., Vásquez, H. C., y Oliva, M. F. R. (2019). Fertilizantes orgánicos en la producción de pastos nativos en Molinopampa, Amazonas-Perú. *Revista De Investigación En Agroproducción Sustentable*. <https://doi.org/10.25127/aps.20183.399>

Irving, L. J. (2015). Carbon Assimilation, Biomass Partitioning and Productivity in Grasses. *Agriculture*, 5(4), 1116–1134.

- <https://doi.org/10.3390/agriculture5041116>
- Lascano-Armas, P., Arcos-Álvarez, C., Guevara-Viera, R., Atzori, A., Molina-Molina, E., Torres-Inga, C., Carmilema-Asmal, J., Serpa-García, G., Aguirre-Juana, A., García-Zumalacarregui, J., Guevara-Viera, G. (2019). Ganancias de peso vivo en novillas que pastan Kikuyo (*Pennisetum clandestinum*, Ex Chiov) fertilizado con pollinaza, *Revista ecuatoriana de ciencia animal*, 3(1), 1 – 11.
- Lowe, K., Bowdler, T., Holton, T. A., and Skabo, S. (2010). Phenotypic and genotypic variation within populations of kikuyu (*Pennisetum clandestinum*) in Australia. *Tropical Grasslands*, 44(2), 84–94. http://era.daf.qld.gov.au/2166/1/Lowe_Phenotypic_and_genotypic-sec.pdf
- Medeiros-Martins, C., Schmitt, D., Duchi-ni, P., Miqueloto, T. y Fischer A. (2021). Defoliation intensity and leaf area index recovery in defoliated swards: implications for forage accumulation. *Scientia agricola*, 78(2), 1-8. <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2019-0095>
- Méndez-Soto, C. (2015). *Edad fisiológica de los cultivos: el uso de Grados Dia. Programa Nacional Sectorial de Producción Agrícola bajo ambientes Protegidos ProNAP. APB-094.* <https://www.mag.go.cr/biblioteca-virtual/av-1816.pdf>
- Morrón, O. N. (2010). *Cenchrus clandestinus* (Hochst. ex Chiov.). Tropicos. <https://www.tropicos.org/Name/100359340>
- Muscolo, A., Panuccio, M. R., and Eshel, A. (2013). Ecophysiology of *Pennisetum clandestinum*: a valuable salt tolerant grass. *Environmental and Experimental Botany*, 92, 55–63. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2012.07.009>
- Neal, W. Fulkerson, B. Sutton. (2011). Differences in water-use efficiency among perennial forages used by the dairy industry under optimum and deficit irrigation. *Irrigation science*, 29(3), 213-232. <https://doi-org.acceso.unicaqua.edu.co/10.1007/s00271-010-0229-1>
- Perera, R. S., Cullen, B., and Eckard, R. (2019). Using Leaf Temperature to Improve Simulation of Heat and Drought Stresses in a Biophysical Model. *Plants*, 9(1), 8. <https://doi.org/10.3390/plants9010008>
- Ramírez-Meléndez, J. E., Hernández-Guzmán, F. J., López-Castañeda, C., Miranda-Jiménez, L., De Jesús Carrillo-Llanos, M. y Quero-Carrillo, A. R. (2020). Crecimiento de plántulas de nueve genotipos de *bouteloua curtipendula* con dos tamaños de cariópside. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 43(2), 171. <https://doi.org/10.35196/rfm.2020.2.171>
- Rodríguez-Molano, C.E., Fonseca-López, D., Niño-Monroy, L.E., Salamanca-López, A.E., Hoyos-Concha, J.L., Otero-Ramírez, I.D., Torres-Lagos, N.R. (2019). Caracterización nutricional y de producción de biomasa de *Sambucus peruviana*, *Sambucus nigra* y *Morus alba* en un banco forrajero. *Ciencia en Desarrollo*, 10(2), 23-32. <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2019-0095>

[tps://doi.org/10.19053/01217488.v10.n2.2019.9098](https://doi.org/10.19053/01217488.v10.n2.2019.9098)

Sbrissia, A. F., Duchini, P. G., Zanini, G. D., Santos, G. W., Padilha, D. A., and Schmitt, D. (2018). Defoliation Strategies in Pastures Submitted to Intermittent Stocking Method: Underlying Mechanisms Buffering Forage Accumulation over a Range of Grazing Heights. *Crop Science*, 58(2), 945–954. <https://doi.org/10.2135/cropsci2017.07.0447>

Schmitt, D., Padilha, D. A., De Medeiros-Neto, C., Filho, H. O., Sollenberger, L. E., and Sbrissia, A. F. (2019). Herbage intake by cattle in kikuyugrass pastures under intermittent stocking method. *Revista Ciencia Agronómica*,

50(3). <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20190058>

Villegas, D. A., Torres, N. a. D., Pino, M. E. M., Terán, Y., Pérez, Y. P., Rivas, S. V., Camacho, W. R. y Guerrero, Á. L. (2019). Comparación de modelos para estimar el área foliar en pasto Cayman (Brachiaria hybrido). *Revista De Investigación En Agroproducción Sustentable*. <https://doi.org/10.25127/aps.20192.492>

Vistoso, E., Martínez. J. (2021). Temperatura: limitante clave en el crecimiento de cultivos y praderas de la Región de Los Ríos. *Instituto De Investigaciones Agropecuarias - Informativo Inia Remehue*, 284.

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



Licencia de Creative Commons

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



Fecha de recibido: 12-06-2023

Fecha de aceptado: 05-10-2023

DOI: 10.22490/21456453.6886

EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE ARROZ (*Oryza sativa L.*) COMPARANDO DOS MÉTODOS DE PREPARACIÓN DEL SUELO

RICE (*Oryza sativa L.*) YIELD EVALUATION COMPARING TWO SOIL PREPARATION METHODS

¹Jordan Alexis Castillo Coronado

²Diana Carolina Polanía Montiel

³Juan Gonzalo Ardila Marín

¹Ingeniero Agrícola, Universidad Surcolombiana, Neiva, Colombia.
Lubey98@hotmail.com

² Magíster en Geomática, Universidad Surcolombiana, Neiva, Colombia.
carolina.polania@usco.edu.co

³ Magíster en Gestión Energética Industrial, Universidad Surcolombiana, Neiva, Colombia.
juan.ardila@usco.edu.co

Citación: Castillo, J., Polanía, D. y Ardila, J. (2024). Evaluación del rendimiento de arroz (*Oryza sativa L.*) comparando dos métodos de preparación del suelo.

Revista de Investigación Agraria y Ambiental, 15(2), 91-112.

<https://doi.org/10.22490/21456453.6886>

■ RESUMEN

Contextualización: el cultivo de arroz (*Oryza sativa L.*), en todo su proceso vegetativo genera en el suelo aumento de la densidad aparente y de la resistencia a la penetración. Los costos de producción del cultivo de arroz se distribuyen en: preparación y adecuación del suelo (20%), siembra (10%), labores culturales que incluyen riego y aplicación de insu- mos como abonos y plaguicidas (50%) y cosecha (20%). Siendo la preparación un componente representativo sobre el cual es posible incidir buscando su reducción.

Vacío de conocimiento: al ser un cultivo de alto rendimiento económico y estar poco tecnificado en el departamento del Huila (Colombia), se busca la implementación de arados de conservación que aporten beneficios económicos y ambientales a la comunidad.

Propósito: con el afán de promover una producción y una agricultura más sostenible y de mejorar las técnicas de labranza mecanizada en el municipio de Palermo, se propuso evaluar las propiedades físicas del suelo y el rendimiento del cultivo de arroz, modificando la preparación convencional con rastra por el uso del cincel.

Metodología: el área experimental conformada por una hectárea se dividió en parcelas experimentales, T1: Una pasada de cincel vibratorio, y T2: Dos pasadas de arado convencional (rastra), se evaluaron

las propiedades físicas del suelo (Densidad Real, Densidad Aparente, Porosidad y Textura) y se realizó seguimiento fenológico al desarrollo del cultivo (Germinación, Máximo Macollamiento, Máximo Embuchamiento, Madurez y Cosecha). Las pruebas de suelo se realizaron antes y después de la labranza entre los 15 y 20 cm de profundidad. El análisis estadístico se realizó mediante Análisis de Varianza (ANOVA) y gráficamente, el análisis tecno económico se realizó con base en la producción y el costo de operación entre los dos tipos de labranza.

Resultados y conclusiones: los resultados mostraron que después de la preparación del suelo la densidad aparente disminuyó en un 5,0% para T1 y 13,5% para T2; igualmente estos efectos conllevaron a que la porosidad aumentará 13,6% y 29,34%, respectivamente, y que los costos de producción fueran \$1159,9 USD para T1 y \$1222,2 USD para T2. Al finalizar se concluye que, al evaluar el rendimiento a la cosecha, no se presentaron diferencias significativas en la producción por efecto del mecanizado, pero se observó estadísticamente diferencia entre el costo de la labranza convencional y la reducida, siendo ésta última 148,9% más económica y menos agresiva para el suelo.

Palabras clave: compactación del suelo, labranza convencional, labranza primaria, labranza de conservación

ABSTRACT

Contextualization: The cultivation of rice (*Oryza sativa* L.) throughout its vegetative process generates an increase in bulk density and penetration resistance of soil. Rice crop production costs are distributed in soil preparation and adaptation (20%), planting (10%), cultural work, including irrigation and application of inputs such as fertilizers and pesticides (50%), and harvesting (20%). Preparation is a representative component on which it is possible to have an impact to reduce it.

Knowledge gap: As it is a high economic yield crop and not very technified in the department of Huila (Colombia), it is sought to implement conservation plows that provide economic and environmental benefits to the community.

Purpose: Aiming to promote more sustainable production and agriculture and to improve mechanized tillage techniques in the municipality of Palermo, it was proposed to evaluate the physical properties of the soil and the yield of the rice crop, modifying conventional harrow preparation with the use of tiller.

Methodology: The experimental area of one hectare was divided into experimental plots, T1: One pass of vibratory tiller, and T2: Two passes of conventional plowing (harrow). The physical properties of the soil were evaluated (True den-

sity, bulk density, porosity, and texture) and the phenological monitoring of the crop development was carried out (germination, maximum tillering, maximum panicle formation, maturity, and harvest). Soil tests were conducted before and after tillage between 15 and 20 cm depth. The statistical analysis was performed using the Analysis of Variance (ANOVA) and the techno-economic analysis was carried out based on production and operating costs between the two types of tillage.

Results and conclusions: The results showed that after soil preparation, bulk density decreased by 5.0% for T1 and 13.5% for T2; these effects also led to an increase in porosity of 13.6% and 29.34%, respectively, and production costs of USD1159.9 for T1 and USD1222.2 for T2. At the end of the study, it was concluded that, when evaluating yield at harvest, there were no significant differences in production because of mechanized tillage. However, a statistical difference was observed between the cost of conventional and reduced tillage, the latter being 148.9% more economical and less aggressive for the soil.

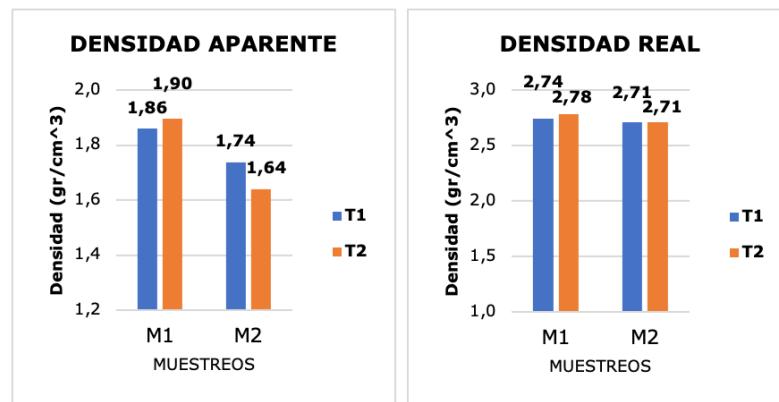
Keywords: conservation tillage, conventional tillage, soil compaction, primary tillage

■ RESUMEN GRÁFICO

Análisis físico

Variables evaluadas:

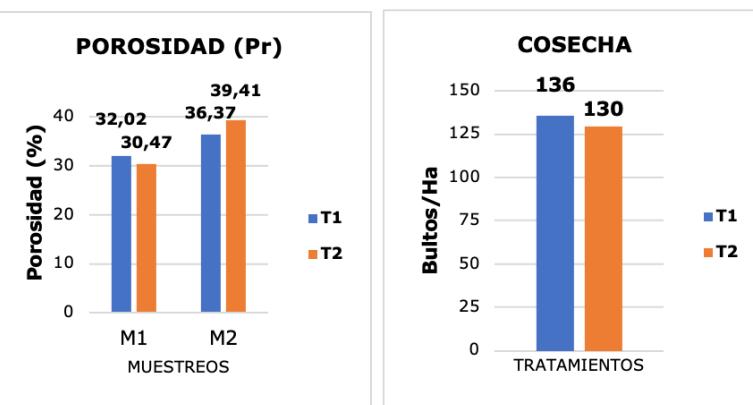
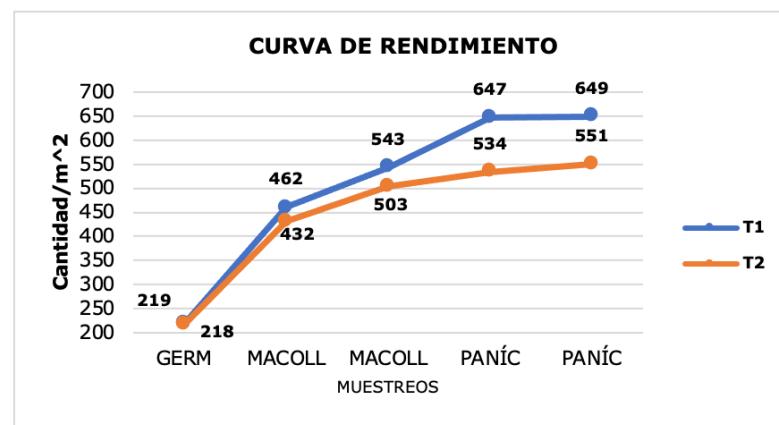
- Densidad aparente (Da)
- Densidad real (Dr)
- Porosidad (Pr)
- Textura



Seguimiento fenológico al cultivo

Variables evaluadas:

- Germinación
- Máximo macollamiento
- Máximo embuchamiento
- Madurez
- Cosecha



Esquema metodológico y descripción de resultados

Fuente: autores.

INTRODUCCIÓN

1

El arroz (*Oryza sativa L.*) es uno de los principales productos de explotación en Colombia (Fernández, 2023), pero su cultivo mecanizado genera tránsito continuo y excesivo causando un aumento de la densidad aparente y de la resistencia a la penetración en el suelo (Marey et al., 2023). Por esto, de forma contradictoria, la labranza convencional termina por disminuir la macro porosidad y aumentar la densidad de los suelos en el largo plazo, induciendo a la compactación (Adesoyin et al. (2023); Gómez-Calderón et al. (2018)); por esta razón, su conocimiento resulta clave para un efectivo manejo de la condición física del suelo en la producción, ya que las plantas requieren de un sistema poroso continuo con buen drenaje para su desarrollo radicular (Jaurixje et al., 2013; Nawaz et al., 2017; Sharma y Kumar, 2023). Así, corregir la compactación recurre a arados específicos para aumentar la capacidad de retención de humedad (Blanco y Lal, 2023), pero debe evitar el sobremecanizado para mantener la estructura del suelo (Ávila, 2015). Con este fin, se hace necesaria la adopción de tecnologías de conservación para el cultivo de arroz, haciendo uso de labranza reducida (Saini et al., 2022), lo cual parece ser una opción ecológica para los agricultores, el medio ambiente y para mantener

la productividad. De ese modo, es importante evaluar el impacto de los sistemas de cultivo y de conservación en las propiedades del suelo, el rendimiento del grano y la productividad (Kumar et al., 2022; Nawaz et al., 2017).

Estudios previos en otros cultivos y territorios han encontrado que: en el Departamento del Casanare la implementación del cincel dio como resultado una mayor conservación de los suelos, disminución de los costos de preparación y mejoramiento del drenaje interno del suelo (Chinchilla, 2003); así mismo, en suelos algodoneros del Cesar se observó que el uso del cincel fue el único que disminuyó el asentamiento de 1.83 a 1.67 gr cm⁻³; también se registraron incrementos en la porosidad con un 15% respecto a la labranza convencional (García y Durán, 1998). Así planteado, el valor teórico y objetivo del proyecto se centra en el conocimiento de la relación labranza-propiedades del suelo, aunque su propósito real es obtener como factor de respuesta el rendimiento del cultivo. De ese modo, se establece la incidencia del mecanizado en las propiedades físicas y en la producción del cultivo, lo cual, se desconoce para la región de la Granja Experimental USCO en el distrito de riego El Juncal.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La siguiente investigación se realizó en la Granja Experimental de la Universidad Surcolombiana situada en Palermo (Huila) al suroeste de Colombia (con latitud $2^{\circ} 53' 32''$ N y longitud $75^{\circ} 18' 24''$ W). El clima de la zona es tropical ecuatorial, con una altura de 462 m.s.n.m., temperatura promedio de 27°C , humedad relativa del 64% y una precipitación anual que oscila entre los 1300 y 1400 mm año $^{-1}$. Así mismo, el área experimental es de una hectárea dividida en parcelas experimentales y estas, a su vez, en tres subparcelas, como puede apreciarse en la Figura 1.

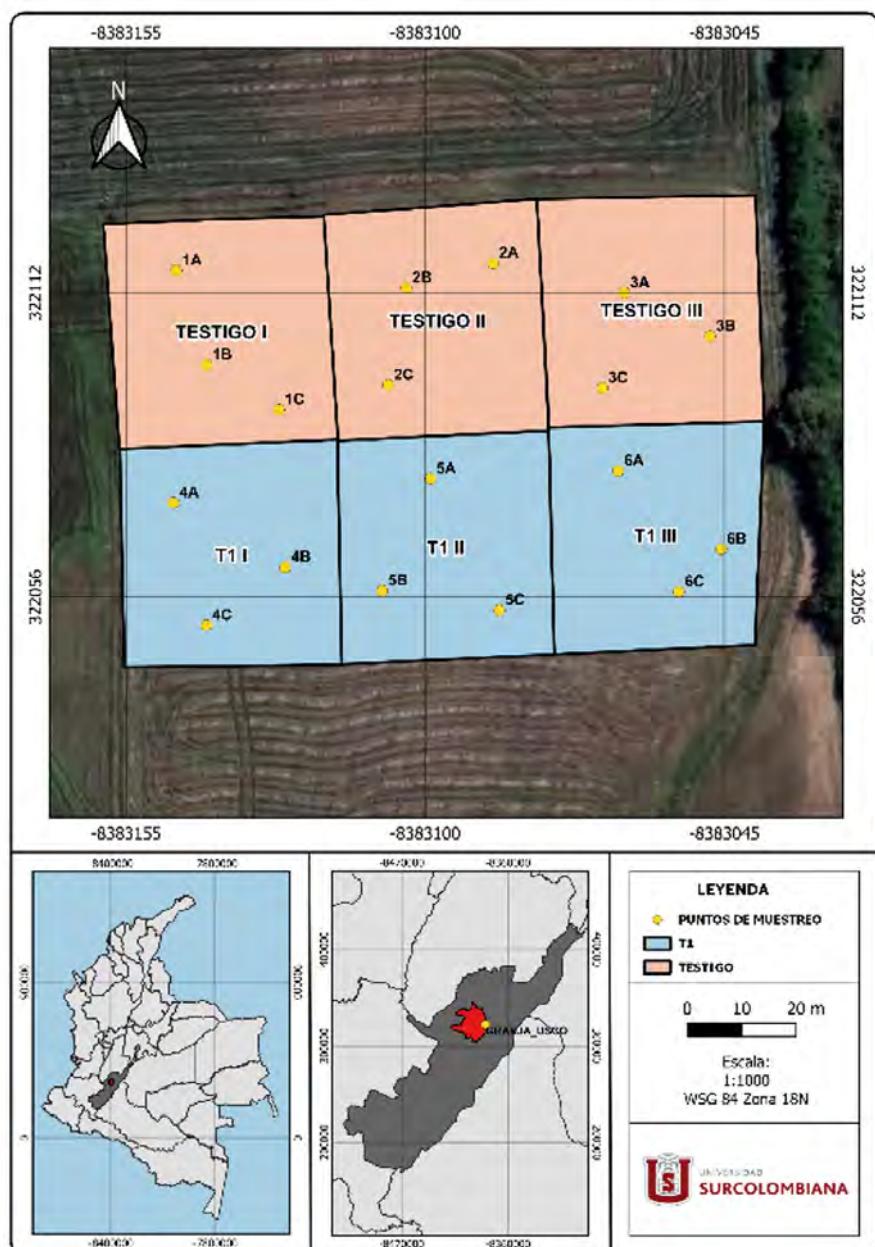


Figura 1. Área de trabajo, ubicación de tratamientos y puntos de muestreo de suelo

Fuente: autores.

Diseño experimental

El diseño experimental fue factorial simple en parcelas divididas, para el cual los tratamientos se distribuyeron en T1: un pase de cincel vibratorio (de cinco cuerpos), y T2: dos pasos perpendiculares de rastra (de 20 discos)-Testigo. Así mismo, los puntos de muestreo se establecieron aleatoriamente de tres por subparcela mediante el método de hiper-cubo latino condicionado (cHL), tipo de muestreo usado para obtener muestras en áreas con exhaustiva información sobre variables de sitio (Liu *et al.*, 2015; Puerres *et al.*, 2021). Se usó el programa de Información Geográfica QGIS® y se programó el algoritmo cHL por medio del paquete de RStudio®, este algoritmo permite la selección aleatoria estratificada, tal que proporciona de forma eficiente las ubicaciones que permiten muestrear variables

sobre un área dada. Una vez ubicados los puntos, se llevaron al GPS para posteriormente ser georreferenciados y señalados con banderines en campo.

Caracterización

Se realizó seguimiento a las propiedades físicas del suelo (Densidad Aparente - Da, Densidad Real - Dr, Porosidad - Pr, y Textura) antes y después del mecanizado teniendo en cuenta las recomendaciones de Mendoza (2017). Se tomaron 18 muestras por seguimiento entre los 15 y 20 cm de profundidad, recolectando entre 0.5 y 1.0 kg de suelo.

La Dr se midió por medio del método del picnómetro, expresando la relación entre la masa seca por unidad de volumen del suelo (sin vacíos), según se indica en la Ecuación 1.

$$Dr = \frac{(MPSS - MPV)Dw}{(MPW - MPV) - (MPSW - MPSS)} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde: Dr [gr cm⁻³]; MPSS: Masa del picnómetro con suelo seco [gr]; MPV: Masa del picnómetro vacío [gr]; MPW: Masa del picnómetro con agua [gr]; MPSW: Masa del picnómetro con suelo y agua [gr]; Dw: Densidad del agua [gr cm⁻³].

La Da se midió por medio del método de cilindro conocido, expresando la relación entre la masa del suelo seco por uni-

dad de volumen total (sólidos y vacíos), según se indica en la Ecuación 2.



$$Da = \frac{MSS}{Vt} \text{ (Ecuación 2)}$$

Donde: Da [gr cm⁻³]; MSS Masa del suelo seco [gr]; y Vt: volumen total del cilindro [cm³].

La porosidad () del suelo está dada por la relación entre la densidad real y la densidad aparente, según la Ecuación 3 (Gutiérrez, 2018).

$$Pr = 1 - \frac{Da}{Dr} \text{ (Ecuación 3)}$$

La determinación de la textura se realizó siguiendo lo estipulado por la NTC 6299 (ICONTEC, 2018), por medio del método de Bouyoucos, expresando los porcen-

jes de agregados del suelo (arena, limo y arcilla), que se expresan según Ecuación 4, Ecuación 5 y Ecuación 6.

$$\%Arena = 100 - \frac{(Lectura corregida a los 40s) * (pW + 100)}{Peso de la muestra} \text{ (Ecuación 4)}$$

$$\%Arcilla = \frac{(Lectura corregida a las 2h) * (pW + 100)}{Peso de la muestra} \text{ (Ecuación 5)}$$

$$\%Limo = 100 - \%Arena - \%Arcilla \text{ (Ecuación 6)}$$

Dónde: pW es el porcentaje de humedad de la muestra [%].

El contenido de humedad del suelo se midió siguiendo lo estipulado por la NTC 1776 (ICONTEC, 1994), por medio del se-

cado, expresando la diferencia de masas antes y después del secado, según se indica la Ecuación 7.

$$pW = \frac{MSW - MSS}{MSS} * 100\% \text{ (Ecuación 7)}$$

Dónde: MSW: Masa del suelo húmedo [gr].

La toma de datos para el seguimiento del cultivo constó de: conteo poblacional en las diferentes etapas del cultivo (germinación 12 ddg, macollamiento 52 ddg, embuchamiento 73 ddg, floración 89 ddg y madurez 108 ddg), y conteo de panículas y rendimiento de la cosecha evaluados al final.

Dónde: ddg son los días después de la germinación.

Cultivo

La preparación del terreno se realizó según la descripción del diseño experimental. El tractor empleado para la preparación del terreno fue un New Holland 8030 de 124 Hp, con profundidades de trabajo de hasta 35 cm para el cincel vibratorio y de no más de 20 cm para el arado de discos (Montaña, 2018). Luego se realizaron caballones con Taipa según las curvas de nivel para la instalación del riego por inundación. El segundo muestreo de suelos y la siembra del cultivo se realizaron luego de la adecuación del terreno (28 de diciembre de 2021). Dicha siembra se efectuó con sembradora mecánica de grano fino Semearo SSM-23, a una densidad de 150 kg ha⁻¹. El plan de fertilización y el cronograma de actividades fue igual para toda el área experimental, siendo diferente entre sí, solo la preparación del terreno. La cosecha se llevó a cabo el 22 de abril de 2022 con cosechadora Massey Ferguson 5650.

Análisis estadístico

El análisis estadístico de los datos se realizó mediante ANOVA por medio de la prueba de Tukey, luego de verificar si los supuestos de distribución normal de los datos (prueba de Shapiro-Wilk) y de homocedasticidad (prueba de Levene) se cumplían (Gutiérrez y de la Vara, 2008); para luego, identificar y cuantificar el efecto del tratamiento experimental. De igual manera, haciendo uso del paquete estadístico de Microsoft Office Excel®, se logró determinar la existencia de diferencias significativas en cada subparcela y luego por parcelas (entre tratamientos), realizando un análisis espacial y luego temporal. Por último, para el mapeo de propiedades se usó la función IDW Interpolation del programa de Información Geográfica QGIS® con los datos característicos después del análisis estadístico.

Análisis tecno económico

El análisis tecno económico consideró los costos de insumos, la cantidad de jornales, el costo de operación de la maquinaria utilizada, la recolección de la cosecha y las diferentes operaciones (directas e indirectas) que se emplearon al realizar la práctica del cultivo de arroz. Igualmente, los ingresos obtenidos con la venta de la producción al molino.

3

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Evaluación de las propiedades físicas

Luego de verificar los datos por medio de las pruebas de Levene y Shapiro-Wilk y determinar el análisis estadístico por medio de la prueba de Tukey (Anexos 1a y 1b), se discutieron los resultados de la siguiente manera:

Al estudiar espaciotemporalmente la Dr del terreno, se tuvo en cuenta que, según la FAO, el valor medio de densidad real que posee un suelo es de $2,65 \text{ gr cm}^{-3}$ (FAO, 2023). En el primer muestreo se eviden-

ció que el suelo poseía una alta densidad real, homogénea, sin diferencias significativas entre tratamientos [$P>0.05$] (Tabla 1 y Figura 2). Para el segundo muestreo los valores tampoco presentaron diferencias significativas en el espacio [$P>0.05$], lo cual era de esperarse que permaneciera constante independientemente del tratamiento, sabiendo que esta propiedad es función de la composición mineralógica del suelo. De ese modo, se indica que no hay cambio en la composición del suelo al no haber diferencia espacial entre tratamientos ni temporal como efecto de la labranza.

■ **Tabla 1.** Densidad real en espacio y tiempo

Muestreos y tratamientos		Puntos de muestreo			Promedio [gr.cm ⁻³]	Desviación estándar	Coeficiente variación (%)	Valor-p
		1	2	3				
M1	T1	2,736	2,791	2,690	2,739 ns	0,051	0,170	0,407
	M2	T1	2,670	2,719	2,737	2,709 ns	0,013	0,118
M1	T2	2,639	2,890	2,819	2,783 ns	0,127	1,404	0,407
	M2	T2	2,726	2,689	2,709	2,708 ns	0,019	0,023

(*) indica diferencias estadísticas entre muestreos.

(**) indica diferencia estadística entre tratamientos.

ns indica que no existieron diferencias estadísticas

Fuente: autores.

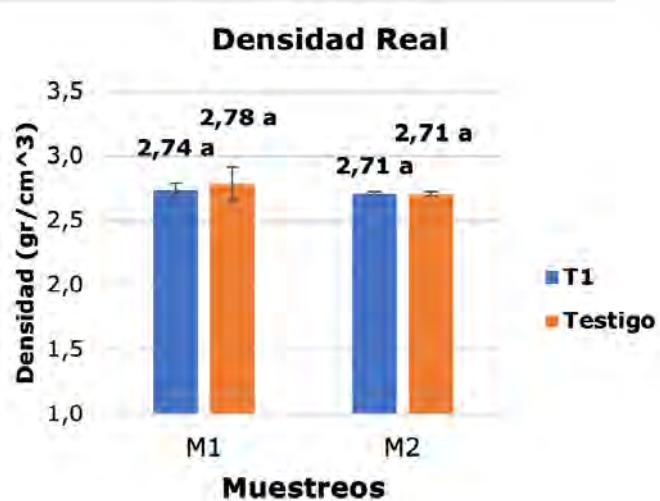


Figura 2. Histograma de Densidad Real en espacio y tiempo.

Las barras verticales indican el error estándar. Letras iguales: no existe diferencia significativa, letras diferentes: existe diferencia significativa

Fuente: autores.

En la Figura 3 se observa el mapa de distribución espacial de Dr; cambios en el espacio podrían obedecer a cambios de composición de un sitio a otro y cambios

en el tiempo pueden asociarse a problemas de muestreo, manejo de muestras en transporte o en laboratorio.

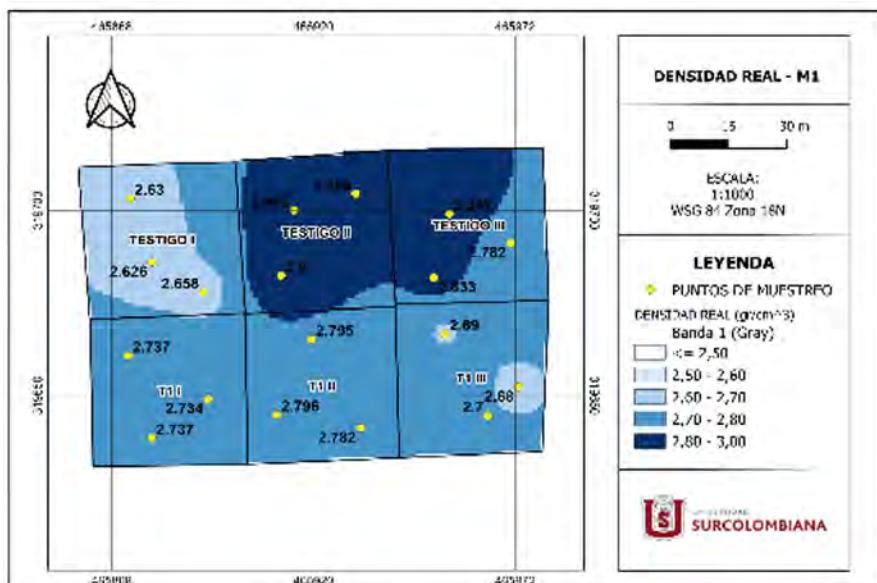


Figura 3. Mapa QGIS Dr espacial

Fuente: autores.

Al estudiar la Da, esta está ligada a la textura y estructura del suelo, predominando en toda el área experimental el suelo franco arenoso (Anexo 2) y dando a entender si el suelo está asentado o no (FAO, 2023); en cuanto al análisis espacial del primer muestreo, los resultados demostraron que no existen diferencias significativas entre tratamientos [$P>0.05$] y que, además, el suelo poseía una Da alta ($> 1,8 \text{ gr cm}^{-3}$) relativamente homogénea, encontrándose todas las medias por encima del valor límite recomendado para el cultivo ($1,6 \text{ gr cm}^{-3}$) como se muestran en la Figura 4 y la

Tabla 2; dicha recomendación expresa que para valores por encima del límite se dificulta el desarrollo radicular y se inhibe el crecimiento de las plantas.

Para el segundo muestreo, tras la labranza con los diferentes esquemas, se encontró diferencia estadística entre tratamientos [$P<0.05$], para lo cual, la Da disminuyó 13,5% para T2 y 5,0% para T1. Dicha disminución se debe al cambio en la estructura del suelo y es posible hasta la profundidad en que se mecanizó (UNLP, 2019).

■ Tabla 2. Densidad aparente en espacio y tiempo

Muestreos y tratamientos		Puntos de muestreo			Promedio [gr.cm ⁻³]	Desviación estándar	Coeficiente variación (%)	F_0 Calculado	Valor-p
		1	2	3					
M1	T1	1,867	1,870	1,849	1,862*	0,011	0,027	1,29-T	0,310
M2	T1	1,718	1,707	1,785	1,737***	0,043	0,121	11,52-T	0,027
M1	T2	1,917	1,877	1,897	1,897*	0,020	0,005	11,49-M	0,004
M2	T2	1,614	1,648	1,660	1,641***	0,024	0,038	40,60-M	9,2E-06

Para un $F_{0,05,2,18}$ crítico = 4,49

F_0 calculado se presentó entre tratamientos (T) y entre muestreos (M).

(*) indica diferencia estadística entre muestreos.

(**) indica diferencia estadística entre tratamientos.

ns indica que no existieron diferencias estadísticas

Fuente: autores.

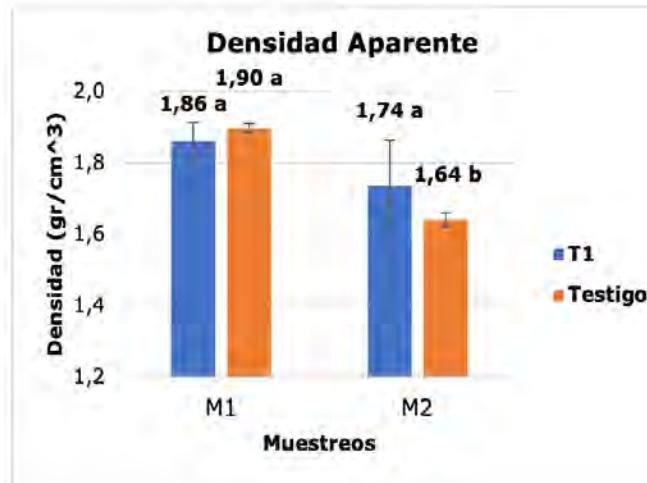


Figura 4. Histograma de densidad aparente en espacio y tiempo.

Las barras verticales indican el error estándar. Letras iguales: no existe diferencia significativa, letras diferentes: existe diferencia significativa

Fuente: autores.

En esta oportunidad, se demostró la diferencia significativa del 5,8% entre muestreos [$P<0.05$], así que un suelo que estaba homogéneo terminó diferenciándose. Además, se observa en los mapas de la Fi-

gura 5, los cambios medidos en el segundo muestreo, pero nótese que, aun así, el valor de Da no disminuyó lo recomendado para el cultivo.

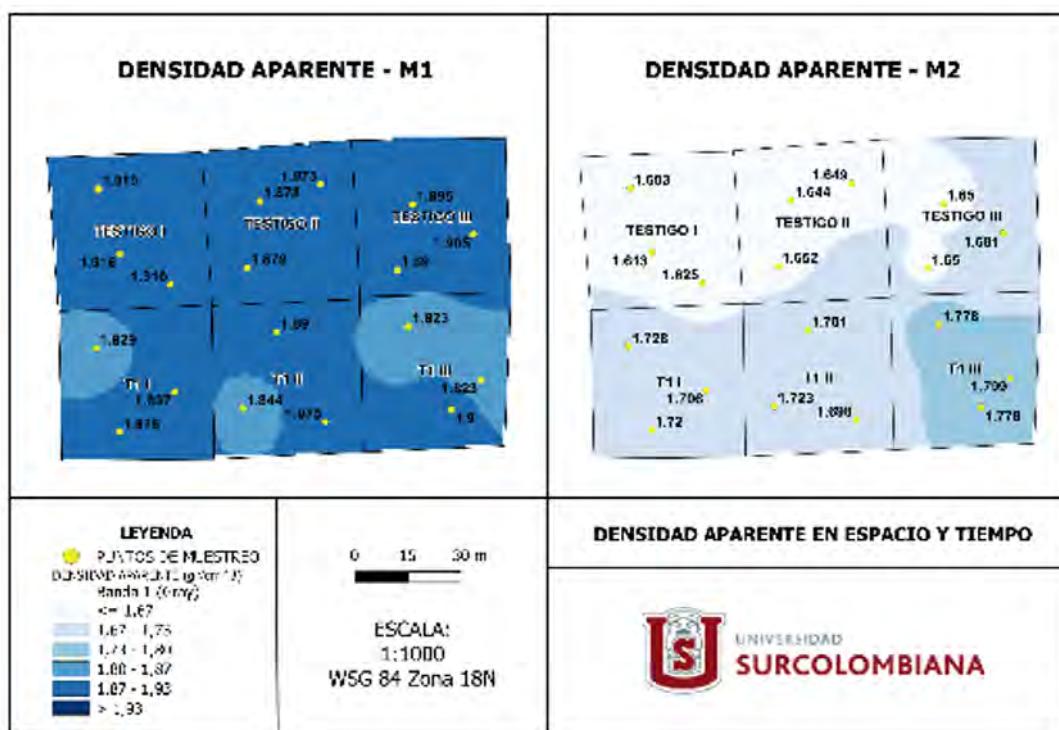


Figura 5. Mapas QGIS Da en espacio y comparación entre muestreos en el tiempo

Fuente: autores.

Sobre la Pr, entre mayor sea su porcentaje, mejor será para la planta, ya que ésta permite un mejor y mayor enraizamiento y aprovechamiento del agua (González-Barrios *et al.*, 2011). Así, para el primer muestreo se obtuvieron resultados bajos, entre el 30 y 32%, propios de un suelo moderadamente poroso (Gutiérrez, 2018), sin diferencias significativas demostrables [$P>0.05$] (Tabla 3 y Figura 6). Para el segundo muestreo, se presentó un

aumento en la porosidad del 29,34% para T2, y 13,6% para T1, con diferencias significativas entre tratamientos [$P<0.05$], presentando incrementos similares a los reportados en estudios previos en el Cesar, conduciendo a convertir el suelo asentado en uno más poroso; aun así, esto podría llevar a problemas de infiltración y retención de humedad en el suelo (García y Durán, 1998; Shaxson y Barber, 2005).

■ Tabla 3. Porosidad en espacio y tiempo

Muestreo	Tratamiento	Dr [gr.cm ⁻³]	Da [gr.cm ⁻³]	Porosidad (%)
M1	T1	2,739	1,862	32,019*
M2	T1	2,729	1,736	36,375***
M1	T2	2,728	1,897	30,474*
M2	T2	2,708	1,641	39,414***

(*) indica diferencia estadística entre muestreos.

(**) indica diferencia estadística entre tratamientos.

ns indica que no existieron diferencias estadísticas.

Fuente: autores.

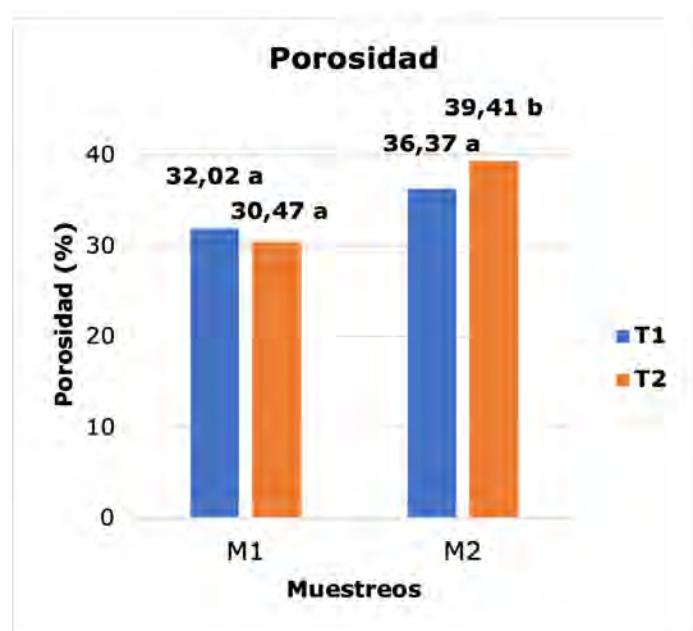


Figura 6. Histograma de Pr en espacio y tiempo

Letras iguales: no existe diferencia significativa, letras diferentes: existe diferencia significativa

Fuente: autores.

Evaluación de rendimiento del cultivo

La Figura 7 evidencia que el cultivo presentó una germinación homogénea

(favorable para el estudio) y que a su vez es baja para todo el lote experimental en relación con las semillas esparcidas (500 semillas m^{-2}) (Rivas, 2020).

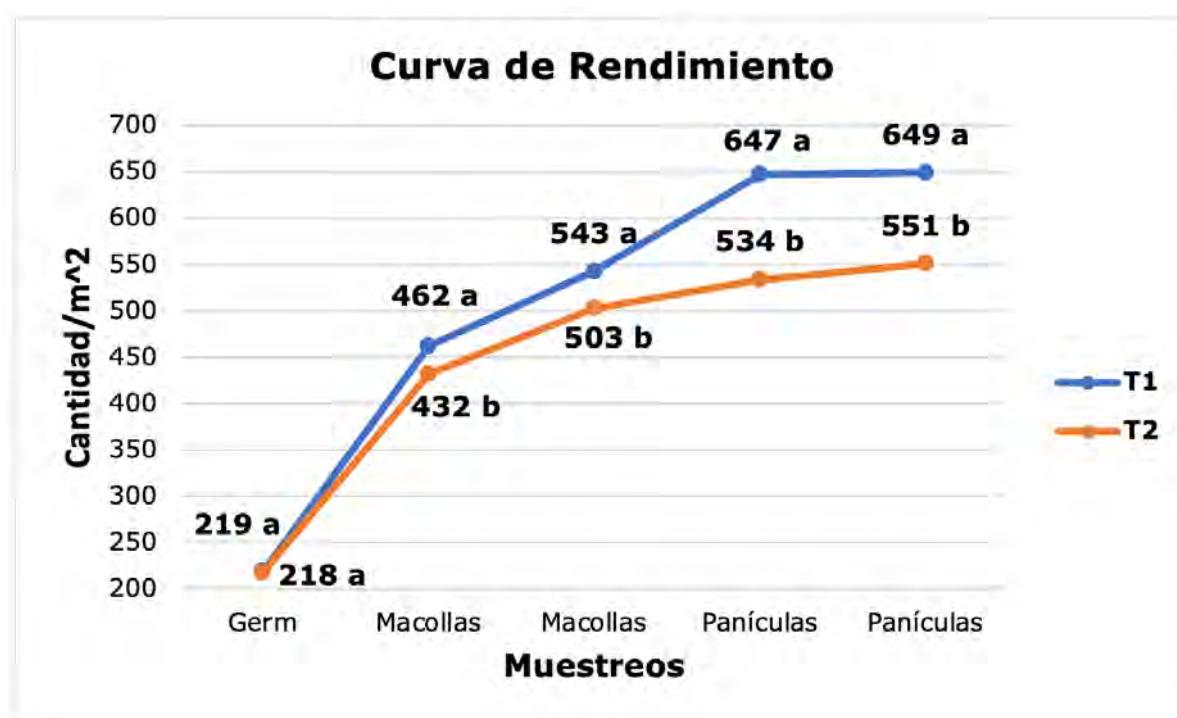


Figura 7. Curva de rendimiento en las diferentes etapas del cultivo.
Letras iguales: no existe diferencia significativa, letras diferentes: existe diferencia significativa

Fuente: autores.

Para el caso de la cantidad de macollas y de panículas, el número de estas varía respecto a la densidad de siembra, a la variedad y a factores ambientales (Degiovanni B. *et al.*, 2010; Rivas, 2020). De ese modo se puede apreciar el aumento a través del tiempo, siendo el T1 el que presentó siempre el mayor número de macollas y de panículas, con un 7,9% y 17,8%

de más respectivamente, en relación con el Testigo. Al final de la fase de macallamiento los tratamientos presentaron entre 528 y 646 por m^2 , que estaría dentro de los reportes realizados por Villalba *et al.* (2017), de entre 572 y 602 macollas m^{-2} . Así mismo, el rendimiento se estableció en la fase final, para lo cual el ANOVA determinó un rendimiento de 130 bultos ha^{-1}

en el Testigo y 136 bultos ha⁻¹ en T1 sin diferencia significativa a partir de los controles hechos en los aforadores (Anexo 3). Este pronóstico no tenía en cuenta el vanamiento, las pérdidas por cosechadora, ni las pérdidas naturales.

Se resalta que, para el análisis del comportamiento del rendimiento, se realizó el seguimiento espacial del último conteo de macollas, panículas y el rendimiento del cultivo (anexos 4, 5 y 6), estos mapas permiten comparar los datos de los últimos conteos con el pesaje de granos en cada aforador y su distribución espacial, a fin de observar si existe correlación entre ellos y poder confirmar las hipótesis generadas a lo largo del proyecto. Ya que, si se relaciona la producción con las propiedades físicas del suelo, especialmente con la porosidad, se hubiera esperado una producción baja, pues esta, al momento de la siembra, tenía un valor relativamente bajo que, según autores, dificultaría el crecimiento de raíces. Las posibles causas a este comportamiento pudieron ser: 1. La forma de riego, pues la presencia, cantidad y calidad del agua de riego afecta el crecimiento de la planta (Lauric *et al.*, 2017), y al ser por inundación y poseer diferentes pérdidas y tiempos de entrada en las parcelas, el comportamiento no mostró una homogeneidad total del riego en el cultivo. Y 2. La forma del abono agregado (Chartuni y Magdalena, 2014), ya que el riego pudo haberlo concentrando en algunas partes y otras no, afectando esto el embuchamiento del grano (Gnecco *et al.*, 2000).

Evaluación de la incidencia del mecanizado en las propiedades y en el rendimiento

En las figuras 4 y 6 se evidenció el comportamiento del cambio que tuvieron las propiedades físicas a través del tiempo, mostrando una disminución en la Da y un aumento en la porosidad por efecto del mecanizado con diferencias significativas [$P<0.05$], así mismo, la Da tiene un comportamiento tal que a mayor mecanizado es menor la densidad. El fenómeno con la Pr es similar puesto que esta propiedad depende de las dos densidades, el hecho de que la Da variará en el lote experimental llevó a que la porosidad se comportara igual, esto permitió establecer la relación entre las propiedades del suelo y el grado de mecanización.

No obstante, este proyecto pretendía establecer la relación existente entre diferentes estrategias de preparación mediante labranza cada vez menos agresiva y el rendimiento del cultivo, lo cual no se logró porque el estudio no mostró una diferencia estadísticamente significativa en la producción del cultivo de arroz en las parcelas experimentales propuestas.

Análisis tecno económico

Dentro de los gastos de implementación del cultivo se observó que T1 resultó 5,37% menor a T2, pero la diferencia del costo de preparación es bastante sensible, siendo 148,9% más económica para T1. Por otro lado, la producción (el ingreso)

presentó gran similitud entre los tratamientos, una diferencia de 4,41% no fue considerada significativa [P>0,05], pero incidió favorablemente en la ganancia, como se observa en las tablas 4 y 5. El manejo agronómico incluye todos los insumos: semillas, fertilizantes, fungicidas y labores culturales. Al finalizar la cosecha,

la ganancia, definida como la diferencia entre producción y gasto, fue mayor para T1 un 60,48% respecto a T2, con diferencias significativas [P<0,05]. Este aumento se debe a que la labranza convencional requiere de mayores costos de operación en comparación a la labranza reducida (con cincel) (Vargas, 2019).

■ Tabla 4. Costos de producción (gastos) entre tratamientos

ITEM	T1		T2	
	%	COSTO (USD)	%	COSTO (USD)
Preparación y adecuación del suelo	4,09	47,44 *	9,66	118,07 *
Siembra del cultivo	10,99	127,45 ns	10,43	127,45 ns
Manejo Agronómico del cultivo	68,61	795,82 ns	65,11	795,82 ns
Recolección y transporte cosecha	16,32	189,25 ns	14,80	180,90 ns
TOTAL	100	1159,96	100	1222,24

(*) indica diferencia estadística.

ns indica que no existieron diferencias estadísticas.

Fuente: autores.

Tabla 5. Comparación de costos entre tratamientos

ÍTEM	T1 (USD)	T2 (USD)
PRODUCCIÓN	1500,90 ns	1434,69 ns
GASTO	1159,96*	1222,24*
GANANCIA	340,94*	212,45*

(*) indica diferencia estadística.

ns indica que no existieron diferencias estadísticas.

Fuente: autores.

4 CONCLUSIONES

Se comprobó que la Dr es una característica constante en los suelos de la granja experimental por depender de su composición; además, el uso de cincel causó una disminución del 5,8% en la Da diferenciándose estadísticamente a nivel espacial y temporal.

También se evidencia que el mecanizado aumenta significativamente la Pr en los tratamientos, especialmente con el sistema convencional (Testigo>T1), comportamiento que se ve inverso en la relación costo beneficio, para el cual el uso del cincel requiere de menores costos de operación respecto al sistema convencional (Testigo<T1).

En la evaluación del seguimiento del cultivo el uso del cincel generó un incremento en todas las etapas del cultivo, observándose aumentos del 7,9% en la cantidad de macollas y del 17,8% en el número de panículas, lo que termina diferenciando estadísticamente los tratamientos.

Modificar la labranza primaria con el uso del cincel nos permite conservar los suelos sin afectar su productividad, mientras se mejora en el tiempo la profundidad efectiva, la retención de humedad y se reducen los costos de preparación (148,9%).

■ CONTRIBUCIÓN DE LA AUTORÍA

Jordan Alexis Castillo Coronado: muestreo en campo, pruebas en laboratorio, análisis de datos, mapeo (QGUIS®) y escritura. **Diana Carolina Polanía Montiel:**

metodología, análisis de datos (QGUIS®), conceptualización y revisión. **Juan Gonzalo Ardila Marín:** metodología, análisis de datos, escritura, revisión y edición.

AGRADECIMIENTOS ■

Se agradece a la Universidad Surcolombiana por permitir la realización de esta investigación en las instalaciones de su granja experimental, así como a las

personas que allí laboran y contribuyen al mejoramiento de las condiciones del suelo para el cultivo de arroz.

LITERATURA CITADA ■

Adesoyin, A. E., MacCarthy, D. S., and Adiku, G.S.K. (2023). Interactive effects of soil compaction, biochar application, and soil water regime on the growth, yield, and water use efficiency of upland rice. *Scientific African*, 21, e01784. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2023.e01784>

Ávila, I. C. (2015). *Adopcion Masiva de Tecnología*. Fedearroz.

Blanco, H., and Lal, R. (2023). Restoration and Management of Degraded Soils. *BT-Soil Conservation and Management*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-30341-8_14

Chartuni, E. y Magdalena, C. (2014). Manual de agricultura de precisión. In *Procisur*. http://www.procisur.org.uy/adjuntos/fb97915de88a_uradeprecision.pdf

Chinchilla, H. M. (2003). *Estudio técnico y de costos para la selección de maquinaria*

ria y método de preparación adecuado para la mecanización del suelo en el cultivo del arroz en la zona Pauto-Tocaria, Nunchia-Casanare. [Universidad de La Salle]. https://ciencia.lasalle.edu.co/administracion_agronegocios/623

Degiovanni B., V., Martínez R., C. P., y Motta O., F. (2010). *Producción Eco-Eficiente del Arroz en América Latina*. Centro internacional de Agricultura Tropical & Fondo Latinoamericano para Arroz de Riego.

Fernández, E. F. (2023). *Implementación de un modelo productivo de arroz (Oryza sativa) tipo secano para fortalecer la producción en el corregimiento Caño Chiquito en el municipio de Paz de Ariporo Casanare* [Universidad de La Salle]. https://ciencia.lasalle.edu.co/ingenieria_agronomica/317/

García P., J. y Durán B., R. (1998). Evaluación de varios sistemas de labranza en un suelo algodonero del Valle del

Cesar. *Encuentro Nacional de Labranza de Conservación* (pp. 241–257). <https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/11437>

Gnecco, M., Valera, L., Bonilla B., R., Murillo S., J. y Aarón, M. (2000). Técnicas de labranza e incorporación de abonos verdes para el mejoramiento y conservación de suelos algodoneros. *Aportes Tecnológicos a la Producción Competitiva y Sostenible del Algodonero en la Región Caribe* (pp. 46–58). Agrosavia. <https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/21286>

Gómez-Calderón, N., Villagra-Mendoza, K. y Solórzano-Quintana, M. (2018). La labranza mecanizada y su impacto en la conservación del suelo (revisión literaria). *Revista Tecnología en Marcha*, 31(1), 170. <https://doi.org/10.18845/tm.v31i1.3506>

González-Barrios, J. L., González-Cervantes, G., Sánchez-Cohen, I., López-Santos, A. y Valenzuela-Núñez, L. M. (2011). Caracterización de la porosidad edáfica como indicador de la calidad física del suelo. *Terra Latinoamericana*, 29(4), 369–377. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792011000400369&lng=es&nrm=iso&tlang=es

Gutiérrez, J. M. (2018). *Diagnóstico de la compactación de suelos arroceros del municipio de Campoalegre-Huila*. [Universidad Nacional de Colombia]. <https://repository.unal.edu.co/handle/unal/69299>

Gutiérrez, H. y de la Vara, R. (2008). *Análisis y diseño de experimentos*. McGraw-Hill Interamericana (2a ed.).

ICONTEC. (1994). *Norma Técnica NTC 1776. Método de ensayo para determinar por secado el contenido total de humedad de los agregados*.

ICONTEC. (2018). *Norma Técnica NTC 6299. Calidad del suelo. Determinación de la textura por Bouyoucos*. <https://tienda.icontec.org/gp-calidad-del-suelo-determinacion-de-la-textura-por-bouyoucos-ntc6299-2018.html>

Jaurixje, M., Torres, D., Mendoza, B., Henríquez, M. y Contreras, J. (2013). Propiedades físicas y químicas del suelo y su relación con la actividad biológica bajo diferentes manejos en la zona de Quíbor, estado Lara. *Biaogro*, 25(1), 47–56. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=85726736002>

Kumar, P., Mishra, A. K., Chaudhari, S. K., Singh, R., Yadav, K., Rai, P., & Sharma, D. K. (2022). Conservation agriculture influences crop yield, soil carbon content and nutrient availability in the rice–wheat system of north-west India. *Soil Research*, 60(6), 624–635. <https://doi.org/10.1071/SR21121>

Lauric, A., De Leo, G., Cerdá, C., Carbonell, C. T., Marini, F., Krüger, H. y Galantini, J. A. (2017). *Efectos de la utilización del cincel en una pastura implantada de agropiro alargado (*Thinopyrum ponticum*)*. https://www.researchgate.net/publication/341579005_EFECTOS_DE_LA_UTILIZACION_DEL

CINCEL EN UNA PASTURA IMPANTADA DE AGROPIRO ALARGADO THINOPYRUM PONTICUM BAHIA BLANCA BUENOS AIRES ARGENTINA

Liu, Z. Z., Li, W., and Yang, M. (2015). Two General Extension Algorithms of Latin Hypercube Sampling. *Mathematical Problems in Engineering*. <https://doi.org/10.1155/2015/450492>

Marey, S. A., Metwally, W. F., El Iraqi, M. E., Aboegela, M. A., and Mohamed, H. I. A. (2023). The Effect of Soil Compaction Using Rice Combine Harvesters on its Physical Properties and Bio- Activities. *Journal of Soil Sciences and Agricultural Engineering*, 14(9), 287–295. <https://doi.org/10.21608/jssae.2023.227767.1173>

Mendoza, R. y Espinoza, A. (2017). *Guía Técnica para muestreo de suelos*. Universidad Nacional Agraria. <https://repositorio.una.edu.ni/3613/1/P33M539.pdf>

Montana. (2018). *Catálogo General*. https://www.maquinariamontana.com/images/catalogos/CG_Montana_2018_2.pdf

Nawaz, A., Farooq, M., Lal, R., Rehman, A., and Hafeez-ur-Rehman. (2017). Comparison of conventional and conservation rice-wheat systems in Punjab, Pakistan. *Soil and Tillage Research*, 169, 35–43. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.01.012>

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). (2023). *Portal de Suelos de la FAO. Propiedades Físicas Del Suelo*. <https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/propiedades-del-suelo/propiedades-fisicas/es/>

Puerres, J. F., Ibarguen, E. y Cerón, M. (2021). Aplicaciones del método de hipercubo latino para la estimación de parámetros de modelos matemáticas desde una perspectiva pedagógica. *Boletín Redipe*, 10(5), 208–219. <https://doi.org/10.36260/rbr.v10i5.1298>

Rivas, M. (2020). *Evaluación de la germinación y producción de las variedades de arroz (O. sativa) f-68 y f-2000 en el municipio de Turbo Antioquia*. Universidad Nacional Abierta y a Distancia.

Saini, A., Manuja, S., Kumar, S., Hafeez, A., Ali, B., and Poczai, P. (2022). Impact of Cultivation Practices and Varieties on Productivity, Profitability, and Nutrient Uptake of Rice (*Oryza sativa* L.) and Wheat (*Triticum aestivum* L.) Cropping System in India. *Agriculture (Switzerland)*, 12(10). <https://doi.org/10.3390/agriculture12101678>

Sharma, P. K., and Kumar, S. (2023). *Soil Structure and Plant Growth BT-Soil Physical Environment and Plant Growth: Evaluation and Management* (pp. 125–154). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-28057-3_5

Shaxson, F. y Barber, R. (2005). Optimización de la humedad del suelo para la

producción vegetal: El significado de la porosidad del suelo. *Boletín de Suelos de la FAO* 79, 0–128. <http://www.fao.org/docrep/008/y4690s/y4690s00.htm>

Universidad Nacional de La Plata. (2019). Porosidad y aireación densidad real y aparente. *Apunte de edafología curso*, 1(1), 9. https://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/42969/mod_resource/content/1/POROSIDAD_Y_AIREACION_26-3-19.pdf

Vargas, J. (2019). *Índice de Beneficio-Costo de Sistemas de Labranza* [Universidad Autó-

noma Agraria Antonio Narro]. http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/47914/K66322_Vargas_Arellano%2C_José_de_Jesús.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Villalba, J. V., Jarma, A. J., and Combatt, E. M. (2017). Physiological response of rice cultivars in different sowing times in Cordoba, Colombia. *Temas Agrarios*, 22(2), 9–19. <https://doi.org/10.21897/rta.v22i2.940>

Conflictos de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.



Licencia de Creative Commons

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



Fecha de recibido: jun-15-2023

Fecha de aceptado: nov-05-2023

DOI: 10.22490/21456453.6908

EXTRACTO ETÉREO EN SEMILLAS DE ZAPALLO (*Cucurbita moschata* Duchesne) EN TRES GENERACIONES DE ENDOCRÍA

ETHEREAL EXTRACT IN BUTTERNUT SQUASH SEEDS (*Cucurbita moschata* Duchesne) IN THREE GENERATIONS OF INBREEDING

Magda Piedad Valdés Restrepo¹
Ginna Alejandra Ordoñez Narváez²
Sanín Ortiz Grisales³

¹ Doctora en Ciencias Agrarias, Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD. Palmira, Colombia.
magda.valdes@unad.edu.co

² Doctora en Ciencias Agrarias, Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Palmira, Colombia. ginna.ordonez@unad.edu.co

³ Doctor en Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia, Palmira, Colombia. sortizg@unal.edu.co

Citación: Valdés, M., Ordoñez, G. y Ortiz, S. (2024). Extracto etéreo en semillas de zapallo (*Cucurbita moschata* Duchesne) en tres generaciones de endocría. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 15(2), 113-129. <https://doi.org/10.22490/21456453.6908>

■ RESUMEN

Contextualización: la semilla de zapallo es rica en extracto etéreo con alta calidad de ácidos grasos poliinsaturados de cadena larga.

Vacío de conocimiento: se desconoce cómo influye la endocría con respecto al carácter extracto etéreo en semillas de zapallo.

Propósito: el objetivo fue evaluar el comportamiento del contenido de extracto etéreo y sus caracteres asociados a la semilla de genotipos de zapallo *C. moschata* en tres generaciones de endocría S_0 , S_1 y S_2 , e identificar los ácidos grasos predominantes en el mejor genotipo.

Metodología: se empleó un diseño de bloques completos al azar en seis genotipos, cuatro repeticiones y cinco plantas por unidad experimental, se valuó la depresión por endocría (DE) entre generaciones para las variables extracto etéreo (EE), peso de semilla por fruto (PSPF), peso unidad de semilla (PUS) y número

de semillas por fruto (NSPF); para la identificación de los ácidos grasos presente en el EE se empleó la técnica de cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC/MC).

Resultados y conclusiones: en los genotipos 129 y 160 al pasar de la generación S_0 a S_1 , no presentaron DE en el carácter EE y al pasar de la generación S_1 a la generación S_2 , solo el genotipo 129 presentó -DE, los demás genotipos aumentaron el contenido de EE. Se presentaron fluctuaciones entre genotipos para las variables PSPF, PUS y NSPF en las cuales no se identificó un factor diferenciador entre generaciones. Al analizar el EE se identificó que el 66.98% corresponde a ácidos grasos monoinsaturados y poliinsaturados, donde el 60.15% corresponde al ácido oleico, además se encontró dentro de los componentes el compuesto escualeno de escasa presencia en semillas oleaginosas.

Palabras clave: aceite, ácidos grasos, *Cucurbitas*, extracción, generación

ABSTRACT

Contextualization: Pumpkin seed is rich in ether extract with a high quantity of long-chain polyunsaturated fatty acids content.

Knowledge gap: It is unknown how inbreeding influences the ether extract character in pumpkin seeds.

Purpose: It aimed to evaluate the behavior of ether extract content and its characteristics associated to the seed of *C. moschata* pumpkin genotypes in three generations of inbreeding S_0 , S_1 , and S_2 and to identify the predominant fatty acids in the best genotype.

Methodology: A randomized complete block design was used with six (6) genotypes, four (4) repetitions, and five (5) plants per experimental unit. Inbreeding depression (ID) between generations was evaluated for the ether extract (EE), seed weight per fruit (PSPF, in Spanish), seed unit weight (PUS, in Spanish), and num-

ber of seeds per fruit (NSPF) variables. Gas chromatography coupled with mass spectrometry (GC/MC) was used to identify the fatty acids present in the EE.

Results and conclusions: In genotypes 129 and 160, when passing from generation S_0 to S_1 , they did not have ID in the EE character, and when passing from generation S_1 to S_2 , only genotype 129 had ID; the other genotypes increased the EE content. There were fluctuations between genotypes for the variables PSPF, PUS, and NSPF in which no differentiating factor between generations was identified. When analyzing the EE, it was identified that 66.98% corresponds to monounsaturated and polyunsaturated fatty acids, of which 60.15% corresponds to oleic acid, and squalene, which is scarcely present in oilseeds, was found among the components.

Keywords: *Cucurbitas*, extraction, fatty acids, generation, oil

■ RESUMEN GRÁFICO



Fuente: autores.

1 INTRODUCCIÓN

El zapallo *Cucurbita moschata* Duchesne, tradicionalmente ha sido doméstico y cultivado en pequeños huertos, de una sola planta se pueden obtener varios frutos, condición que favorece múltiples generaciones de endocria (Lira *et al.*, 2016; Castellanos *et al.*, 2018) y, a pesar de su naturaleza alógama, no es evidente la depresión asociada a la endogamia para los caracteres de valor agronómico (Ortiz *et al.*, 2020). La diversificación de esta espe-

cie ha permitido utilizarla como alimento, empleando los frutos, flores y semillas, las cuales son consideradas oleaginosas por su contenido de aceite de hasta del 50% (Ordóñez *et al.*, 2014) y una composición de ácidos grasos poliinsaturados alrededor del 62%, además de aminoácidos, vitaminas y alto contenido en zinc que favorecen su valor nutricional (Karrar *et al.*, 2019). Según Goldschmidt y Byrdwell, (2021), los ácidos grasos conjugados son

ácidos poliinsaturados con enlaces dobles o más, separados por un enlace carbono-carbono; es así como al analizar el aceite de semillas de zapallo se identificó que predominan los ácidos grasos insaturados de tipo Omega-3 y Omega-6, ácidos grasos esenciales que los monogástricos no pueden sintetizar y deben consumir en la dieta (Abdelnour, 2023).

La especie más conocida de zapallo es *C. pepo* variedad styriaca, de las semillas se extrae aceite de alta calidad, reconociendo por su color verde oscuro, olor y sabor a nuez (Vigor *et al.*, 2022). El aceite de semillas de zapallo es particularmente valioso porque contiene tipos de compuestos inusuales como escualeno, tocofenoles y carotenoides (Tańska *et al.*, 2020), por lo cual ha sido objeto de mejoramiento genético para incrementar tanto el contenido como la calidad del aceite (Paris *et al.*, 2016; Adam *et al.*, 2018). Ortiz *et al.*, (2009) reportaron un porcentaje de extracto etéreo en semilla del 30 al 40% en una colección de genotipos de *C. moschata*. Nawirska *et al.* (2013) reportaron la concentración de aceite en la semilla de 12 cultivares de *C. máxima* y *C. pepo* en un rango del 40 al 48%, respectivamente; Türkmen *et al.* (2017) evaluaron 120 genotipos de *C. moschata*, *C. máxima* y *C. mixta* y encontraron

una variación para el contenido de aceite entre el 30 y el 38%; Charaya *et al.* (2023) evaluaron el contenido de aceite en genotipos de styriaca y reportaron 36% de aceite en semillas con cascara.

La endocría es una herramienta útil en el mejoramiento genético, porque permite modificar las frecuencias alélicas de una población y ha sido asociado a la naturaleza alógama de la especie, debido a que las autofecundaciones sucesivas pueden afectar los individuos altamente heterocigotos de la población; sin embargo, en las *Cucurbitas* en general, se ha encontrado que la endocría es significativa únicamente en algunos caracteres agronómicos (Restrepo *et al.*, 2018). En la especie *Cucurbita moschata* Duch., para caracteres de calidad en fruto se presenta un comportamiento muy variable, es así como la media del carácter entre genotipos aumenta o disminuye al pasar de una generación a otra y en muchos casos se ve poco afectada (Espitia *et al.*, 2006; Ortiz *et al.*, 2014).

El objetivo de la presente investigación fue evaluar el comportamiento del contenido de aceite en la semilla de zapallo *C. moschata* en tres generaciones de endocría e identificar los ácidos grasos predominantes en el mejor genotipo.

2

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización

Los campos de cruzamientos (generaciones endocríadas S₁ y S₂) en zapallo se realizaron durante dos semestres consecutivos en la granja Mario Gonzales Aranda (GMGA), ubicada en el municipio de Palmira a 03° 30' 26.8" Latitud norte y 76° 18'47.6" Longitud Oeste, 998 msnm (Valdés, 2014). El orden taxonómico de estos suelos se clasificó como Calciustert Údico Arcilloso sobre arenoso Aniso Vermiculítico Isohipertérmico. Las pruebas macromoleculares se llevaron a cabo en el laboratorio de semillas de la Universidad Nacional de Colombia sede Palmira y el análisis de cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC/MC) se realizó en el laboratorio de análisis instrumental Sede Medellín.

Material Vegetal

De una investigación realizada por Valdés *et al.* (2014) sobre la variabilidad en frutos y semillas de *Cucurbita moschata*, se trabajó con las introducciones que presentaron los más altos contenidos de extracto etéreo, según el índice de selección ponderado (ISP) aplicado a la colección del programa de hortalizas con 295 introducciones de *Cucurbita moschata* Duchesne.

Factor de ponderación

Extracto etéreo de la semilla (EE) 0.4; producción de semilla por fruto (PSPF) 0.3 y número de frutos por planta (NFP) 0.3. En la Tabla 1 se presentan las introducciones seleccionadas.

■ **Tabla 1.** Introducciones seleccionadas con base en el contenido de extracto etéreo (EE) para *C. moschata*

Origen	Introducción	EE (%)
Colombia	308	41.09
Centro América	129	42.43
	142	44.27
	144	37.39
	136	39.69
	160	46.43

Fuente: adaptado de Valdés *et al.* (2014).

Las semillas provenientes de un solo fruto para cada introducción se sembraron en la Granja Mario González Aranda, empleando un diseño experimental de bloques completos al azar, con seis genotipos (tratamiento), cuatro repeticiones y cinco plantas por unidad experimental para un total de 120 plantas, empleando una distancia de siembra de 3 metros entre y dentro de surco con una densidad de siembra de 1.111 plantas.ha. Durante la etapa de botones florales (40 días en *C. moschata*) se embolsaron las flores pistiladas y estaminadas dispuestas en la misma planta, utilizando una bolsa de tull de 5 mm de malla y en las primeras horas de la mañana del día siguiente se realizó la polinización controlada para cada generación S_0 , S_1 y S_2 .

En el período de formación y maduración de frutos (120 a 150 días de siembra en *C. moschata*), se cosecharon individualmente y se separó la semilla de las introducciones endocriadas en generación S_1 , la cual se llevó nuevamente a siembra en el semestre siguiente, bajo el mismo método de polinización controlada y se obtuvo la semilla de las introducciones endocriadas en generación S_2 .

Variables evaluadas

La variables evaluadas fueron número de semillas por fruto (NSPF); peso unidad de semilla (PUS) (peso en gramos de 100 semillas tomadas de la octava parte de las semillas de cada fruto, técnica del octaneo); peso de semillas por fruto (PSPF) (expresada en gramos) y contenido de extracto etéreo (EE) (porcentaje de grasa

total en una muestra de 3.0 gramos de semilla (AOAC, 1990).

Para cada introducción se midió el contenido de extracto etéreo (EE) utilizando la técnica AOAC (920.39-1990) de extracción soxhlet por gravimetría, entendido como el porcentaje del contenido de extracto etéreo de la semilla, corregido por la materia seca de la muestra (105 °C por 24 h); para la caracterización del extracto etéreo se analizaron las muestras de semilla proveniente de autocruzamientos (generación S_2) mediante cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC/MC), se identificó el tipo de compuesto, peso molecular y grado de saturación, los porcentajes de ácidos grasos saturados, monoinsaturados y poliinsaturados, se determinaron mediante el número de ácidos grasos divididos el número de picos. El porcentaje de depresión por endocría (DE) se estimó mediante el índice $1-(w_s / w_0)$, donde w_s es el valor promedio del carácter en las plantas endocriadas y w_0 es el valor promedio del carácter en las plantas no endocriadas (Ortiz *et al.*, 2014). La significancia estadística de la depresión por endocría se estimó utilizando el nivel de probabilidad de $p < 0,05$.

Para los datos obtenidos se realizó la prueba de supuestos de normalidad empleando un gráfico de cuantiles teóricos [Q-Q plot] que señaló una distribución normal con un intervalo de confianza de $p = 0,05$. Para el análisis de homocedasticidad se utilizó el procedimiento F-test en SPSS. Posteriormente, se realizó un análisis de varianza (ANDEVA) para el

contenido de extracto etéreo (EE), peso de semillas por fruto (PSPF), peso unidad de semilla (PUS) y número de semillas por fruto (NSF); el análisis estadístico fue

realizado utilizando como herramienta el software SPSS (versión 21 Windows) y Microsoft Office, Excel 2010.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 2, se presentan los cuadros medios y suma de cuadrados para el contenido de EE y caracteres asociados. Para los genotipos dentro de cada generación no se observaron diferencias ($P<0.05$) para el carácter EE, pero sí se observaron diferencias entre generaciones ($P <0.05$), a su vez se presentaron diferencias significativas ($p<0.05$) en la interacción genotipo por generación para los caracteres peso de semilla por fruto (PSPF) y peso unidad de semilla (PUS) y altamente significativas ($p<0.01$) para número de semillas por fruto (NSPF); esto indica que al

menos de uno de los genotipos evaluados es diferente para estos caracteres en estudio. Es necesario resaltar que los caracteres PSPF y NSPF son considerados caracteres altamente poligénicos asociados al rendimiento de semilla; según Singh *et al.* (2015) en *Cucurbitas* se manifiesta una pérdida de vigor hasta la segunda o tercera generación de endocría, porque en ella se logra alcanzar un mayor grado de homocigosis, por lo tanto, se espera una mayor acumulación y expresión de genes favorables para la expresión del carácter.

■ **Tabla 2.** Cuadros medios CM y contribución de la suma de cuadrados SC para los caracteres extracto etéreo (EE), peso de semillas por fruto (PSPF), peso unidad de semilla (PUS) y número de semillas por fruto (NSF) en genotipos de zapallo con diferente grado de endocría de la especie *C. moschata*

	GL	EE (%)			PSPF (g)			PUS (g)			NSPF		
		CM	SC		CM	SC		CM	SC		CM	SC	
Generación	2	62.77	5.39	*	1.47	10.94	**	45.44	16.39	**	15079.69	3.64	ns
Genotipo	5	41.29	8.87	ns	1.80	33.49	**	27.58	24.87	**	30552.60	18.42	*

Genotipo*-Generación	10	56.33	24.21	*	0.40	15.04	*	12.51	22.57	*	27641.37	33.32	**
Error	34	24.82	36.26		0.21	26.97		4.80	29.44		9166.40	37.57	
Promedio	26.60				58.66				12.16		428.80		
CV (%)	18.72				24.88				18.02		22.32		

Diferencias significativas **(p<0.01) y * (p<0.05).

Fuente: autores

Para un mayor entendimiento de cómo se comportan las variables entre generación, en la Tabla 3, se presentan los valores para la depresión por endocría (DE), expresada en porcentaje, para el carácter EE y sus componentes asociados a la semilla para la especie *Cucurbita moschata*. Los valores positivos (+DE) indican depresión por endocría (reducción del promedio), mientras que los valores negativos (-DE) corresponden al incremento del promedio del carácter.

Los mayores porcentajes de DE₀₋₁ para el carácter EE se presentaron en los genotipos 142 y 136 con porcentajes de 31.4% y 37.6% respectivamente y, en menor proporción, se presentó en el genotipo 308 y 144 con porcentajes 20.4% y 7.5% respectivamente, indicando que son genotipos que pueden reducir su contenido de EE; no obstante, en los genotipos 129 y 160, con valores de -33.9% y de -5.8% respectivamente, no presentaron DE, al contrario incrementan su rendimiento al pasar de S₀ a S₁. Por otra parte al pasar de la gene-

ración de endocría S₁ a S₂ se incrementó el contenido de EE en todos los genotipos, con excepción del 129, por lo tanto los valores de DE fueron negativos. Este resultado fue similar al encontrado por Ortiz *et al.* (2014) en caracteres de semilla en *C. moschata*, en donde las expresiones que afectan el promedio del carácter son más habituales durante la primera generación, con mayor frecuencia de alelos recesivos indeseables, pero esta condición parece ser temporal en zapallo, dado que puede recuperarse en la siguiente generación, mostrando mayor tolerancia a la endocría en comparación con otras especies.

La DE en las variables como PSPF, PUS y NSPF varia de una generación a otra, sin embargo, el genotipo 142 aumenta significativamente el NSPF de generación en generación, lo que indica que al aumentar el número de semillas aumenta la posibilidad de obtener mayor rendimiento de EE por fruto y por hectárea, además, no presenta DE.

■ **Tabla 3.** Depresión por endocría, expresada en porcentaje para el carácter extracto etéreo (EE) y caracteres asociados en la semilla de *Cucurbita moschata*

GENOTIPO		E.E (%)	PSPF(g)	PUS(g)	NSPF
308	DE ₀₋₁	20.4*	40.2*	22.4*	15.4*
	DE ₁₋₂	-4.5ns	12.8*	15.4*	2.4ns
129	DE ₀₋₁	-33.9*	-25.5*	-27.8*	-11.8*
	DE ₁₋₂	24.2	29.6*	17.8*	44.4*
142	DE ₀₋₁	31.4	9.1ns	36.0*	-52.8**
	DE ₁₋₂	-29.9*	16.8*	1.7ns	-9.9ns
144	DE ₀₋₁	7.5	38.3*	28.3*	21.7*
	DE ₁₋₂	-27.5*	31.7*	-28.7*	-15.8*
136	DE ₀₋₁	37.6	40.2*	28.1*	6.3ns
	DE ₁₋₂	-31.8*	-2.8ns	5.7ns	15.2*
160	DE ₀₋₁	-5.8ns	31.6*	14.9*	33.1*
	DE ₁₋₂	-20.8*	-3.9ns	-14.9*	6.3ns

Diferencias significativas * ($P<0.05$). Donde: $DE_{0-1} = 100*(S_0-S_1)/S_0$; $DE_{1-2} = 100*(S_1-S_2)/S_0$

Fuente: autores

Perfil de ácidos grasos en aceite de zapallo

El genotipo 160 no presentó depresión por endocría entre generaciones para el contenido de EE, por tanto, este fue el genotipo seleccionado para determinar mediante la separación de compuestos volátiles la identificación de ácidos grasos, a partir de cromatografía GC-MS en el EE de la semilla. En la Tabla 4, se presenta la información correspondiente al tiempo de retención, área en (%), identificación del compuesto, ácido graso detectado y su

respectivo nombre sistemático. Se identificaron 17 picos, los cuales son proporcionales a la cantidad del compuesto presente, se evidencia que el EE de la semilla de zapallo está formado por 47.05% de ácidos grasos saturados y 47.06% de ácidos grasos insaturados, correspondiente a 29.41% monoinsaturados, 17.65% diinsaturados y escualeno 5.88%. Predominan en el aceite de la semilla los ácidos grasos oleico, linoleico, margárico y esteárico, estos resultados están acordes con lo reportado por Dotto y Chacha (2020).

■ Tabla 4. Compuestos volátiles identificados a partir de cromatografía GC-MS en el EE de la semilla de *C. moschata*

Pico	Tiempo de retención (min)	Área (%)	Identificación del compuesto	Ácidos grasos	Nombre sistemático
1	17,02	0,20	Ácido tridecílico	Saturado	Ácido tridecanoico
2	20,52	0,24	Ácido Palmitoleico	Monoinsaturado	Ácido 9-cis Hexadecenoico
3	21,04	20,49	Ácido margárico	Saturado	Ácido Heptadecanoico
4	22,40	1,49	Ácido mirístico	Saturado	Ácido tetradecanoico
5	23,16	0,22	Ácido Margarico	Saturado	Ácido Heptadecanoico
6	25,47	60,15	Ácido oleico	Monoinsaturado	9-octadecenoico
7	25,96	9,99	Ácido esteárico	Saturado	7-octadecanoico
8	26,29	0,26	Ácido linoleico	Poliinsaturado	Octadecadienoico
9	26,51	0,17	Ácido linoleico	Poliinsaturado	Octadecadienoico
10	26,74	2,02	Ácido linoleico	Poliinsaturado	Octadecadienoico
11	26,91	2,13	Ácido oleico	Monoinsaturado	9-octadecenoico
12	27,67	0,81	Ácido esteárico	Saturado	7-octadecanoico
13	29,79	0,41	Ácido oleico	Monoinsaturado	10-octadecenoico
14	30,50	0,42	Ácido oleico	Monoinsaturado	10-octadecenoico
15	31,24	0,57	Ácido Araquídico	Saturado	Eicosanoico
16	36,46	0,16	Ácido Behénico	Saturado	Docosanoico
17	43,87	0,26	escualeno	C30H50	Tetracosahexano

Fuente: autores

Según Posert y Baconguis (2023), la cuantificación del área bajo la curva de un compuesto, se relaciona con la cantidad total presente en el analito inyectado, por tanto, entre más área mayor será la cantidad del compuesto. Lo que indica que el 60.15% fue el pico con mayor área que corresponde a la presencia del ácido oleico (monoinsaturado), siendo este ácido de la serie omega 9 típico de aceites como aceite de olivo (Santa-María *et al.*, 2023),

su importancia radica en que disminuye la expresión de proteínas relacionadas con el transporte de colesterol y disminuye la oxidación de lipoproteínas de baja densidad (LDL) previniendo la arterosclerosis (Chen *et al.*, 2011; Yang *et al.*, 2022). También se identificó que el 66.07% corresponde a la presencia de ácidos monoinsaturados y poliinsaturados incluyendo el escualeno, convirtiendo el aceite de semillas de zapallo en un aceite de altísima

calidad nutricional. Fisher y Kinsey (2023) mencionan que el escualeno es un triterpenoide de la familia de los terpenoides, que comprende seis dobles enlaces (Paramasivan y Mutturi, 2022), los terpenoides se producen en las plantas en pequeñas cantidades, pero el escualeno es inusual porque se encuentra en altas concentraciones en el aceite del hígado de tiburón, que se ha utilizado como adyuvante de vacunas contra la influenza (Fox y Haensler, 2013). Las semillas de zapallo contienen aproximadamente 0.26% de escualeno.

Cabe resaltar que entre los ácidos poliinsaturados se destaca el ácido linoleico, un ácido graso esencial de la serie omega-6 (18:2n-6) caracterizado por tener dobles enlaces, un ácido esencial para el cuerpo humano (Li *et al.*, 2023), requerido

para el crecimiento y el desarrollo (Taha, 2020); Brenna (2016) menciona que el ácido linoleico se considera no funcional para el cerebro debido a su baja concentración menor al 2% de los ácidos grasos totales y sostiene que el ácido palmítico (16:0), ácido oleico (18:1n-9) y el ácido estearíco (18:0) constituyen el 84% de los ácidos grasos cerebrales en humanos. El tiempo de retención según Zhang *et al.* (2009), se entiende como el tiempo que tarde un péptido desde la inyección de la muestra hasta la aparición del pico máximo, es decir, cuanto más fuerte sean las interacciones de la muestra con la superficie tendrá mayor retención del compuesto; al evaluar los ácidos desde esa perspectiva, se identifica que el compuesto escualeno tiene la mayor retención en comparación con los demás ácidos grasos.

4 CONCLUSIONES

El avance generacional en *C. moschata* mostró diferencias significativas entre los genotipos y su interacción, los valores de la depresión por endocría fluctuaron entre generaciones en todos los genotipos, excepto para el genotipo 160 que incrementó el contenido de aceite en semilla en cada generación y se propone como el de mejor genotipo para el carácter EE. Los caracteres número de semillas y peso de semillas por fruto, en los genotipos evaluados mostraron variación entre ge-

notipos y generaciones sin evidenciar un único patrón en su comportamiento frente a la endocría. El carácter extracto etéreo en la semilla de zapallo puede mejorarse por selección de genotipos que expresen el mejor comportamiento para sus componentes en cada generación de endocría. El aceite de semillas de zapallo contiene ácidos grasos insaturados como el **ácido oleico** y **ácido linoleico**, esenciales para la salud humano y presenta un tipo de compuesto inusual, el escualeno.

CONTRIBUCIÓN DE LA AUTORÍA ■

Magda Piedad Valdés Restrepo: investigación, análisis de datos, escritura, revisión y edición. **Ginna Alejandra Ordoñez Narváez:** metodología, investi-

gación, conceptualización, análisis de datos, escritura. **Sanín Ortiz Grisales:** logística, revisión y edición.

AGRADECIMIENTOS ■

Los autores agradecen al programa de investigación de mejoramiento genético, agro-nomía y producción de semillas de hortalizas de la Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira.

LITERATURA CITADA ■

Abdelnour, S.A., Metwally, M.G.E., Bahgat, L.B, and Naiel, M.A.E. (2023). Pumpkin seed oil-supplemented diets promoted the growth productivity, antioxidative capacity, and immune response in heat-stressed growing rabbits. *Trop Anim Health Prod.* 30(1),55
<https://doi.org/10.1007/s11250-023-03460-3>

Adam, E., Bernhart, M., Müller, H., Winkler J., and Berg, G. (2018). The *Cucurbita pepo* seed microbiome: genotype-specific composition and implications for breeding. *Plant Soil*, 422, 35–49.

<https://doi.org/10.1007/s11104-016-3113-9>

Association of official agricultural chemistry. (AOAC). (1990). *Official Methods of Analysis of the Association of Official analytical chemists*. 15 Ed. Método número 920.39.

Brenna, J. T. (2016). Arachidonic acid needed in infant formula when docosahexaenoic acid is present. *Nutr. Rev.* 74(5), 329–336. <https://doi.org/10.1093/nutrit/nuw007>

Castellanos-Morales, G., Paredes-Torres, L.M., Gámez, N., Hernández-Rosales, H.S., Sánchez-de la Vega, G., Barreira-Redondo, J., Aguirre-Planter, E., Vázquez-Lobo, A., Montes-Hernández, S., Lira-Saade, R., and Eguiarte, L.E. (2018). Historical biogeography and phylogeny of Cucurbita: insights from ancestral area reconstruction and niche evolution. *Molecular phylogenetics and evolution*, 128, 38-54. <https://doi.org/10.1016/j.ympev.2018.07.016>

Charaya, A., Chawla, N., Dhatt, A., Sharma, M., Sharma, S., and Kaur, I. (2023). Evaluation of biochemical composition of hulled and hull-less genotypes of pumpkin seeds grown in subtropical India. *Heliyon*, 9(1), e12995. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e12995>

Chen, J., Li, Q., Zhang, Y., Yang, P., Zong, Y., Qu, S., and Liu, Z. (2011). Oleic Acid Decreases the Expression of a Cholesterol Transport-Related Protein (NPC1L1) by the Induction of Endoplasmic Reticulum Stress in CaCo-2 Cells. *J. Physiol. Biochem.* 67(2), 153–163. <https://doi.org/10.1007/s13105-010-0058-y>

Dotto, J.M., and Chacha, J.S. (2020). The potential of pumpkin seeds as a functional food ingredient: A review. *Scientific African*, 10, e00575. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00575>

Espitia, M., Vallejo, F.A. y Baena, D. (2006). Depresión en vigor por endogamia y heterosis para el rendimiento y sus componentes en zapallo Cucurbita moschata Duch. *Ex poir. Rev. Fac. Nal.*

Agr. 59 (1), 3089-3103. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/refame/article/view/24291>

Fisher, K.J., Kinsey, R., Mohamath, R., Fan, T., Liang, H., Orr, M.T., Lykins, G.R., Guderian, J.A., Bakken, J., Arguila, D., Ramer-Denisoff, G., Larson, E., Qi, Y., Sivananthan, S., Smolyar, K., Carter, D., Paddon, C.J., and Fox, C.B. (2023). Semi-synthetic terpenoids with differential adjuvant properties as sustainable replacements for shark squalene in vaccine emulsions. *npj Vaccines*, 8, 14. <https://doi.org/10.1038/s41541-023-00608-y>

Fox, C. B., and Haensler, J. (2013). An update on safety and immunogenicity of vaccines containing emulsion-based adjuvants. *Expert Rev. Vaccines*, 12(7), 747–758. <https://doi.org/10.1586/14760584.2013.811188>

Goldschmidt, R., and Byrdwell, W.G.C. (2021). Analysis of Seven Seed Oils Containing Conjugated Fatty Acids. *Separations*, 8(4), 51. <https://doi.org/10.3390/separations8040051>

Karrar, E., Sheth, S., Navicha, W. B., Wei, W., Hassanin, H., Abdalla, M., and Wang, X. (2019). A potential new source: Nutritional and antioxidant properties of edible oils from cucurbit seeds and their impact on human health. *Journal of food biochemistry*, 43(2), e12733. <https://doi.org/10.1111/jfbc.12733>

Li, H., Ma, X., Wang, W., Zhang, J., Liu, Y., and Yuan, D. (2023). Enhancing the accumulation of linoleic acid and

α -linolenic acid through the pre-harvest ethylene treatment in *Camellia oleifera*. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1080946. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1080946>

Lira, R., Eguiarte, L., Montes, S., Zizumbo-Villarreal, D., Marín, P. C. G., and Quesada, M. (2016). *Homo sapiens–Cucurbita* interaction in mesoamerica: domestication, dissemination, and diversification. In *Ethnobotany of Mexico* (pp. 389-401). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6669-7_15

Nawirska A., Biesiadac, A., Lętowskaa, A., and Kucharskaa, A. (2013). Characteristics of antioxidant activity and composition of pumpkin seed oils in 12 cultivars. *Food Chemistry* 139(1–4), 155–161. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.02.009>

Ordóñez N. G. A., Ortiz, G. S., Valdés, R. M. P. y Vallejo, C. F. A. (2014). Selección de introducciones de *Cucurbita* por contenido de aceite en semillas. *Acta Agron.* 63(2), 175-180. <https://doi.org/10.15446/acag.v63n2.40026>

Ortiz, S., Pasos, S.C., Rivas, X.C., Valdés, R.M.P. y Vallejo, C.F.A. (2009). Extracción y caracterización del aceite de semillas de zapallo. *Acta agronómica*, 58(3), 145-141.

Ortiz, S., Bastidas, V., Ordoñez, G., Valdés, M. P., Vallejo F. and Baena, D. (2014). Inbreeding and Gene Action in Butter-nut Squash (*Cucurbita moschata*) Seed starch Content. *Rev. Fac. Nal. Agr.* 67(1),

7169-7175. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v67n1.42634>

Ortiz-Grisales, S., Valdés, M.P., y Vallejo-Cabrera, F.A. (2020). Efecto de la endocría sobre habilidad combinatoria del rendimiento y calidad en zapallo (*Cucurbita moschata* Duchesne). *Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient.* 23(1), e1176 <https://doi.org/10.31910/rudca.v23.n1.2020.1176>

Paramasivan, K., and Mutturi, S. (2022). Recent advances in the microbial production of squalene. *World J Microbiol Biotechnol*, 38(5), 91. <https://doi.org/10.1007/s11274-022-03273-w>

Paris, H.S. (2016). Genetic Resources of Pumpkins and Squash, *Cucurbita* spp. In: Grumet, R., Katzir, N., Garcia-Mas, J. (eds) Genetics and Genomics of Cucurbitaceae. *Plant Genetics and Genomics: Crops and Models*, 20. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/7397_2016_3

Posert, R., and Baconguis, I. (2023). Appia: Simpler chromatography analysis and visualization. *PLoS One.* 18(1), e0280255. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0280255>

Restrepo, J., Vallejo, F. y Restrepo, E. (2018). Heterosis del rendimiento y peso promedio de fruto en función de la endogamia en *Cucurbita moschata* Duch. ex Poir. *Agronomía Colombiana*, 36(1), 5–12. <https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v36n1.66312>

Santa-María, C., López-Enríquez, S., Montserrat-de la Paz, S., Geniz, I., Reyes-Quiroz, M.E., Moreno, M., Palomares, F., Sobrino, F., and Alba, G. (2023). Update on Anti-Inflammatory Molecular Mechanisms Induced by Oleic Acid. *Nutrients*, 15(1), 224. <https://doi.org/10.3390/nu15010224>

Singh, S. K., Singh, S. V., and Srivastava, J. P. (2015). Studies on heterosis and inbreeding depression in cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Agriways*, 3(2), 107-111.

Taha, A.Y. (2020). Linoleic acid—good or bad for the brain? *npj Sci Food*, 4(1). <https://doi.org/10.1038/s41538-019-0061-9>

Tańska M., Ogrodowska, D., Bartoszewski, G., Korzeniewska, A., and Konopka, I. (2020). Seed Lipid Composition of New Hybrids of Styrian Oil Pumpkin Grown in Poland. *Agronomy*. 10(8), 1104. <https://doi.org/10.3390/agronomy10081104>

Türkmen, Ö., Özcan, M. M., Seymen, M., Paksoy, M., Uslu, N., and Fidan, S. (2017). Physico-chemical properties and fatty acid compositions of some edible pumpkin seed genotypes and oils. *Journal of Agroalimentary Processes and Technologies*, 23(4), 229-235.

Valdés, R.M.P., Ortiz, G.S., Vallejo, C.F.A. y Baena, G.D. (2014). Variabilidad en frutos y semillas de *Cucurbita moschata* Duch. y *Cucurbita argyrosperma*

subsp. *sororia* L.H. Bailey Merrick, and D.M. Bates. *Acta Agronómica* 63(2), 282-293. <https://doi.org/10.15446/acag.v63n3.41052>

Vigor, C., Züllig, T., Eichmann, T.O., Oger, C., Zhou, B., Rechberger, G.N., Hilsberg, L., Trötzmüller, M., Pellegrino, R.M., Alabed, H.B.R., Hartler, J., Wollinski, H., Galano, J.M., Durand, T., and Spener, F. (2022). α-Linolenic acid and product octadecanoids in Styrian pumpkin seeds and oils: How processing impacts lipidomes of fatty acid, triacylglycerol and oxylipin molecular structures. *Food Chem.*, 371(1), 131194. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131194>

Yang, Z.H., Nill, K., Takechi-Haraya, Y., Playford, M.P., Nguyen, D., Yu, Z.X., Pryor, M., Tang, J., Rojulpote, K.V., Mehta, N.N., Wen, H., and Remaley, A.T. (2022). Differential Effect of Dietary Supplementation with a Soybean Oil Enriched in Oleic Acid versus Linoleic Acid on Plasma Lipids and Atherosclerosis in LDLR-Deficient Mice. *Int. J. Mol. Sci.*, 23(15), 8385. <https://doi.org/10.3390/ijms23158385>

Zhang, J., González, E., Hestilow, T., Haskins, W., and Huang, Y. (2009). Review of peak detection algorithms in liquid-chromatography-mass spectrometry. *Curr Genomics*. 10(6), 388-401. <https://doi.org/10.2174/138920209789177638>

Conflictos de intereses

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



Licencia de Creative Commons

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



Fecha de recibido: 13-03-2023

Fecha de aceptado: 08-08-2023

DOI: 10.22490/21456453.6740

IMPLEMENTACIÓN DE ATRAPANIEBLAS COMO ALTERNATIVA DE ABASTECIMIENTO DE AGUA EN EL MUNICIPIO DE TULUÁ

IMPLEMENTATION OF FOG CATCHERS AS AN ALTERNATIVE FOR WATER SUPPLY IN THE MUNICIPALITY OF TULUÁ

Eyder Fabián Jaramillo Arenas¹

Giovany Tascón Ortiz²

Karol Andrea Leal Vásquez³

Valentina Lamus Molina⁴

Luisa Fernanda Cabezas Burbano⁵

Vivian Milen Orejuela⁶

¹ Ingeniero Agropecuario,
Unidad Central del Valle del Cauca. eyder.jaramillo01@uceva.edu.co

² Ingeniero Agropecuario,
Unidad Central del Valle del Cauca. giovany.tascon01@uceva.edu.co

³ MSc, Ingeniera Agrícola,
Unidad Central del Valle del Cauca. kleal@uceva.edu.co

⁴ PHD, MSc, Bióloga,
Unidad Central del Valle del Cauca. vlamus@uceva.edu.co

⁵ PHD, MSc, Ingeniera Física,
Unidad Central del Valle del Cauca. lcabezas@uceva.edu.co

⁶ MSc, Ingeniera de Sistemas,
Unidad Central del Valle del Cauca. vorejuela@uceva.edu.co

Citación: Jaramillo, E., Tascón, G., Leal, K., Lamus, V., Cabezas, L. y Orejuela, V. (2024). Implementación de atrapanieblas como alternativa de abastecimiento de agua en el municipio de Tuluá. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 15(2), 131-150.

<https://doi.org/10.22490/21456453.6740>

■ RESUMEN

Contextualización: el consumo mundial de agua ha ido en aumento desde el siglo XX. Este aumento se debe a que ahora existe una gran demanda en las economías desarrolladas y emergentes; otro aspecto por considerar es el crecimiento de la población a nivel mundial, que se relaciona con un incremento en la demanda de recursos en los sectores agrícola, pecuario e industrial, lo cual resulta en un aumento en el consumo de dichos recursos.

Vacío de conocimiento: los sistemas de captación de agua de niebla (atrapanieblas) se están convirtiendo en una alternativa útil para el aprovechamiento de los recursos hídricos ya disponibles en el medio ambiente, para su almacenamiento y posterior distribución en diversas actividades del desarrollo humano. Sin embargo, en Colombia se carece de estudios con relación a la implementación de estos sistemas artesanales.

Propósito: En esta investigación, se indagó por la pertinencia en la utilización de cuatro atrapanieblas con diferentes porcentajes en la polisombra, ubicados en los predios el Vijal y Alto Bonito que corresponden a una zona ecosistémica de

bosque subandino; con el propósito de determinar la viabilidad de esta herramienta en la recolección de agua de niebla.

Metodología: se realizó un diseño de bloques completamente al azar. Se empleó el método estadístico ANOVA y la prueba de Duncan determinó si había una diferencia significativa entre los porcentajes de polisombra utilizados y la altura de los predios. La recolección de datos se llevó a cabo durante un periodo de seis semanas.

Resultados y conclusiones: como resultado, la polisombra del 65% captó 980 ml en el predio de Alto Bonito; y en el predio del Vijal la captura fue de 784 ml. La malla con 80% de sombra obtuvo 990 ml en la finca Alto Bonito y 794 ml en la finca Vijal. No hubo diferencias significativas en la captación de agua con relación al porcentaje de sombra de las polisombras. En cuanto a la altura de los predios, hay una diferencia significativa, la retención de agua promedio en la finca Vijal fue de 25.5 ml/día mientras que en el predio de Alto Bonito fue de 31.8 ml/día.

Palabras clave: agua potable sostenible, atrapanieblas, bosque subandino, captación de agua, polisombra

ABSTRACT

Contextualization: Global water consumption has been increasing since the 20th century. This increase is because there is now a high demand in developed and emerging economies. Another aspect to consider is the population growth worldwide, which is related to an increase in the demand for resources in the agricultural, livestock, and industrial sectors, increasing the consumption of these resources.

Knowledge gap: Fog harvesting systems (fog catchers) are becoming a useful alternative to use water resources already available in the environment for storage and subsequent distribution in various human development activities. However, Colombia lacks studies on implementing these artisanal systems.

Purpose: This study investigated the usefulness of using four fog catchers with different percentages of shade cloth, located in the Vijal and Alto Bonito sites, corresponding to the Sub-Andean Forest ecosystem, to determine the feasibility of this fog water harvesting product.

Methodology: A design of a completely randomized block was carried out. The ANOVA statistical method was used, and Duncan's multiple range test determined if there was a significant difference between the percentages of shade cloth used and the height of the properties. Data collection was carried out for a period of six weeks.

Results and Conclusions: As a result, the 65% shade cloth captured 980ml in the Alto Bonito property, and in the Vijal property, the capture was 784ml. The 80% shade cloth obtained 990ml at the Alto Bonito farm and 794ml at the Vijal farm. There were no significant differences in water harvesting compared to the shade percentage of the shade cloth. Regarding the height of the properties, there is a significant difference; the average water retention in the Vijal farm was 25.5ml / day, while it was 31.8ml / day in the Alto Bonito farm.

Key words: Fog catcher, Sub- Andean Forest, water harvesting, shade cloth, sustainable drinking water

■ RESUMEN GRÁFICO



Nota: en la figura se muestra el resumen de los procesos implementados para el desarrollo de la investigación realizada

Fuente: autores.

1 INTRODUCCIÓN

En el informe de la Organización de las Naciones Unidas ONU del año 2019 sobre el estado del recurso hídrico a nivel mundial, se estipula que el consumo del agua aumentará cerca de 1% hasta el año 2050, lo cual se debe a que solamente los sectores industriales y el doméstico em-

plean alrededor del 20 y 30 %. En este mismo informe, la ONU reporta que más de 2000 millones de habitantes sufren escasez de agua debido a su posición geográfica, mientras que 4000 millones de personas carecen del recurso, al menos un mes por año, lo cual se atribuye al cambio climático.

De esta forma, el cambio climático es un fenómeno que afecta el ciclo hidrológico y por ende su suministro y disponibilidad para todas las labores, que requieren de dicho recurso, hecho que se presenta gracias al aumento o disminución de las precipitaciones, así como su frecuencia (ONU, 2019). Por lo tanto, se estima que cerca de 850 millones de personas no cuentan con agua potable en sus hogares, situación que se incrementa cuando 34 millones de habitantes que corresponden al 4% de dicha cifra debe desplazarse cerca de media hora para poder recolectar agua (OMS, 2017). Finalmente, otra gran parte de la población mundial se abastece de la recolección de las aguas superficiales (ONU, 2019). Es importante destacar que casi el 60% de esta población se encuentra en África Subsahariana donde el recurso hídrico es casi nulo (UNESCO, 2015).

En Latinoamérica y el Caribe los procesos de explotación (agrícolas, pecuarios e industriales) afectan tanto al recurso hídrico como al suelo, generando consecuencias negativas en el balance hidrológico, la disponibilidad y calidad del agua en nacimientos y cuencas hidrográficas. Por otro lado, en el caso puntual de Colombia, son diferentes los usos que se le dan a dicho recurso, asimismo se manifiestan diferentes dificultades en cuanto a su tratamiento. Además, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, afirma que en Colombia hay cerca de 391 municipios que viven la escasez del recurso, situación que se va extendiendo a otras zonas del país.

A fin de mitigar en algo la problemática que se presenta en el país, entidades como las Corporaciones Autónomas Regionales CAR de cada departamento implementan dentro de las herramientas del manejo del paisaje orientadas a la reforestación, aislamientos de protección y la restauración ecológica para el cuidado y la conservación del recurso hídrico; mediante estas estrategias de innovación se busca que el acceso al agua sea más equitativo y benéfico, ampliando la cantidad y calidad, empleando las características del relieve y las condiciones de los diversos ecosistemas presentes en el país (CRA, 2019).

En el corregimiento de la Iberia, municipio de Tuluá, departamento del Valle del Cauca, se cuenta con un ecosistema de bosque subandino, que se extiende desde 1200 hasta 2500 metros sobre el nivel del mar, con temperaturas medias de 20°C (Arias, citado por SGAP y CIAT, 2011). En el caso de los ecosistemas de bosque subandino, caracterizados por la presencia de fauna y flora endémica que contribuyen a evitar los deslizamientos tendientes en esta zona y favorecen la conservación del recurso suelo y por ende del agua (SGAP y CIAT, 2011), otorgan ventajas y condiciones favorables para la implementación de sistemas de captación de agua de niebla. Cabe mencionar que dicho corregimiento cuenta con altitudes comprendidas entre los 1300 y los 1600 m.s.n.m., las cuales presentan condiciones óptimas para la implementación de atrapanieblas, debido a que suelen tener temperaturas bajas en horas de la noche, humedad alta, presencia de fuertes vientos durante la mayor época del año y niebla en horas de

la mañana, factores que en su conjunto son propicios para la recolección de las pequeñas gotas de agua presentes en ese tipo de bosque (SEDAMA, 2020), correspondiente al ecosistema subandino, cuya importancia radica que es un lugar clave para que se dé la niebla y por ende exista un gran potencial hídrico (Cereceda *et al.*, 2014).

Cabe resaltar que los sistemas de atrapanieblas son una solución innovadora y sostenible para capturar la humedad presente en la niebla y convertirla en agua potable utilizable. Estos sistemas aprovechan la capacidad de ciertas estructuras, mallas o redes especiales, para atrapar las partículas de agua suspendidas en la niebla. A medida que la niebla pasa a través de estas estructuras, las partículas de agua se condensan y se acumulan en una zona de recolección (Rivera, 2011). Una de las principales características de los sistemas de atrapanieblas es su capacidad para extraer agua en áreas donde la disponibilidad de recursos hídricos es limitada (Domen *et*

al., 2014). Estos sistemas son especialmente útiles en regiones áridas o semiáridas, donde la niebla es una fuente potencial de agua valiosa. Además, los sistemas de atrapanieblas son una alternativa sostenible, ya que no requieren el uso de energía eléctrica ni productos químicos para su funcionamiento (Morichi *et al.*, 2018). Por lo cual, se han llevado a cabo diversos proyectos que utilizan sistemas de atrapanieblas que, con su implementación adecuada, pueden mejorar la calidad de vida de las comunidades y fomentar la conservación de los recursos naturales (LeBoeuf and de la Jara, 2014; Valjarević *et al.*, 2023).

Considerando lo anterior, el objetivo del estudio fue realizar la implementación de cuatro atrapanieblas: dos en el predio El Vijal, propiedad de la Unidad Central del Valle del Cauca y dos en el predio Alto Bonito, en el corregimiento de la Iberia del municipio de Tuluá, Valle del Cauca, como una alternativa para el abastecimiento de agua.

2

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

Por lo general en el municipio de Tuluá del Departamento del Valle del Cauca, se registran temperaturas que varían entre los 19-30 °C, una humedad relativa entre el 77-90%, se presenta una variación en la precipitación durante todo el año, siendo

noviembre el mes con el mayor promedio con 152 ml y julio con el menor promedio con alrededor de 80 ml de lluvia. Con relación a la velocidad del viento, no presenta una variación considerable y puede encontrarse entre 0.0-5.1 km/h (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo

Territorial, 2010) y la nubosidad es poco variable durante el año. Sin embargo, se presenta que el mes más despejado del año es julio con un 28% de nubosidad y el mes más nublado inicia en septiembre con un 89% de nubosidad (Castañeda y Mendoza, 2014). Cabe resaltar que, para poder desplegar equipamientos que se ajusten a las necesidades de la población, es necesario ubicar dichos equipamientos en zonas con mucha nubosidad (Garcidueñas, 2018). El proceso experimental se realizó en el transcurso del año 2022.

La investigación se realizó en dos ubicaciones así:

- ❖ **Predio El Vijal:** ubicado en el corregimiento de la Iberia, con las siguientes coordenadas 4°3'39.64"N y 76°6'23.13"W. A 1360.3 m.s.n.m., con unas características de bosque subandino (SEDAMA, 2020), presencia de afluentes hídricos, uso de suelo agropecuario e infraestructura para el desarrollo de actividades para la escuela veredal.
- ❖ **Predio Alto Bonito:** ubicado en el corregimiento la Iberia, con las siguientes coordenadas: 4°3'52.79"N y 76°5'54.66"W. A 1554,3 m.s.n.m., con características de bosque subandino (SEDAMA, 2020), en conservación y sistema agroforestal de café, uso de suelo agropecuario e infraestructura distribuida en vivienda familiar, procesamiento del café y almacenamiento.

Entre los dos predios existe una diferencia de altura de 194 m.s.n.m.

Establecimiento en campo de los atrapanieblas

Descripción de las mallas: las polisombras son un hilo de malla tejida y están elaboradas de fibras resistentes de polietileno de alta densidad, siendo utilizadas para agricultura, avicultura, construcciones, entre otras (Quinche, 2019) y sirven para regular la luminosidad (Madariaga, 2017). Para la realización de esta investigación se emplearon porcentajes de sombra de 65 y 80% respectivamente, ya que estos permiten el tránsito de la niebla para que pueda quedarse en la malla, debido al tamaño de poro que traen definidas. Las corrientes de aire que pudieran afectar las estructuras de los atrapanieblas pueden circular a través del tejido y así no sufrir daños en las mallas y la tela (Huertas y Molina, 2016). Los calibres empleados se distinguen entre sí debido a que su tejido es más denso y cerrado a medida que aumenta el porcentaje de luminosidad.

Construcción de los atrapanieblas:

- ❖ Enterrar los postes de guadua a 80 cm de profundidad. Cabe resaltar, que es necesario dejar 1 m libre entre el suelo y la malla. A partir de esta distancia se colocan las mallas de polisombra (65% y 80%) que miden 2 x 2 m, una enseguida de la otra, separadas por un poste de guadua y con diferentes porcentajes de sombra.

- ❖ En la parte inferior de las mallas se instala un tubo de 4 pulgadas dividido a la mitad, cuya función es recolectar el agua capturada en forma de niebla con un desnivel del 20%. Al final del tubo en un extremo se instala una reducción de 1/2 pulgada, donde se conecta una manguera del mismo diámetro que conducirá el agua a un tanque de almacenamiento de 20 litros, debidamente aforado para realizar el registro del agua captada.
- ❖ El tanque de almacenamiento se ubicó bajo tierra y se encontraba debida-

mente sellado, con el objetivo de minimizar las pérdidas de agua captada.

- ❖ Se instaló en el perímetro de ubicación de la estructura (atrapanieblas), un cerco de guadua y alambre de púa calibre 14, para evitar así la interferencia de algún animal que pueda afectar la estructura y disposición de los atrapanieblas.

En la Figura 1, se muestra cómo se realizó la construcción y el establecimiento en campo de los atrapanieblas y, en la Figura 2, se muestra cómo se realizó el proceso de captación del agua.



Figura 1. Construcción y establecimiento en campo de los atrapanieblas

Nota: en la Figura 1 se muestra el establecimiento en campo y construcción de los atrapanieblas
A. Marco de madera con malla. **B.** Ahoyado para poner poste de guadua. **C.** Cosechado de guadua. **D.** Alambre de púa y manguera de $\frac{1}{2}$ ". **E.** Instalación de la canaleta de P.V.C. **F.** Malla instalada

Fuente: autores.

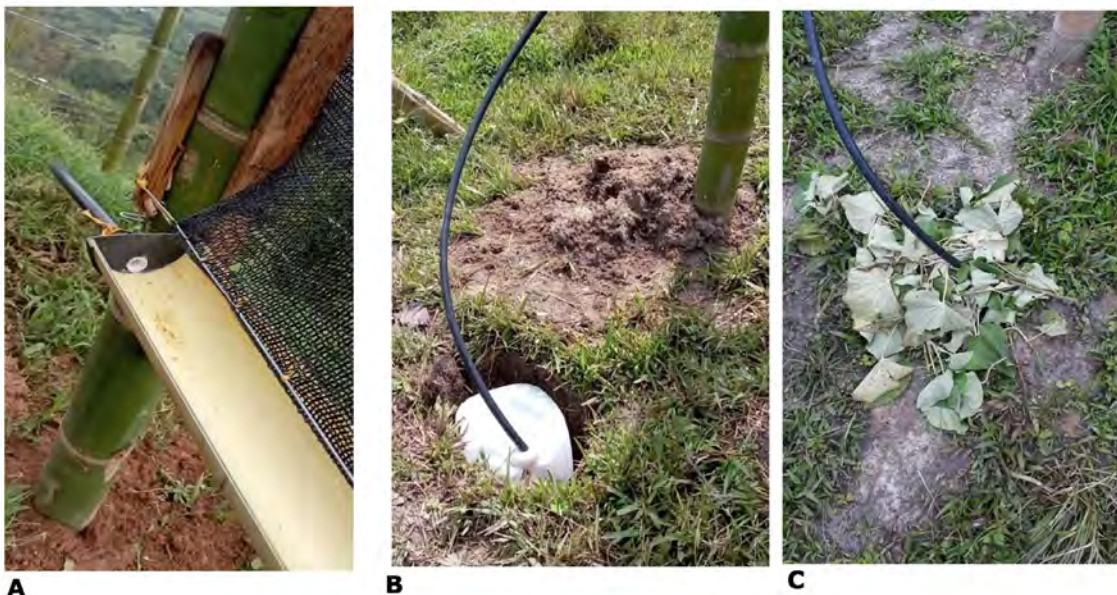


Figura 2. Proceso de captación

Nota: en la Figura 2 se muestra el sistema de captación y almacenamiento de agua de los atrapanieblas. **A.** Conducción de agua entre canaleta de PVC y manguera. **B.** Tanque de almacenamiento de agua. **C.** Protección con vegetación al tanque de almacenamiento

Fuente: autores.

Monitoreo

La realización del registro y monitoreo de la captura de agua se cuantificó de manera diaria, en los cuatro tanques de 20L instalados, dos por cada predio. La medición se realizó a las 7:00 a.m., durante 6 semanas. Este tiempo se determinó después de realizar la revisión de literatura en donde se estipula este tiempo como el indicado para la medición en la captación.

Análisis estadísticos

El estudio se llevó a cabo utilizando un diseño de bloques completos al azar con

dos bloques representados como dos fincas El Vijal y Alto Bonito. Para el desarrollo de esta investigación, los tratamientos empleados consistieron en dos polisombras con porcentajes de sombra de 65% y 80% y la variable de respuesta estudiada fue la acumulación de agua de niebla recogida.

Para realizar la recolección de datos, se colocaron colectores de agua en cada tratamiento y en cada bloque. Los recolectores de agua consistieron en recipientes de plástico con capacidad de 25 litros, que se instalaron debajo de cada polisombra en cada finca. Los recolectores de agua se va-

ciaron y midieron todos los días durante seis semanas.

A partir de los datos obtenidos, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) para evaluar la diferencia en la acumulación de agua recogida entre los tratamientos y los bloques.

Sobre la base de lo anterior se utilizó el siguiente modelo estadístico:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + \epsilon_{ij}$$

(Ecuación 1)

Donde:

Y_{ij} : es la observación de la variable de respuesta (acumulación de agua) para el tratamiento i en el bloque j .

μ : es la media general.

β_j : es el efecto del bloque j en la acumulación de agua.

τ_i : es el efecto del tratamiento i en la acumulación de agua.

ϵ_{ij} : es el error aleatorio.

Para el análisis de varianza se empleó el software estadístico R versión 4.2.1. A partir de este análisis de varianza (ANOVA), se encontró una significancia estadística de $p<0.05$. Una vez que la ANOVA ha demostrado que existen diferencias significativas entre los grupos, la prueba de Duncan se aplica para realizar comparaciones múltiples entre todas las combinaciones posibles de medias de grupo. Esta prueba asigna rangos a las medias y los utiliza para determinar si las diferencias observadas son estadísticamente significativas. Teniendo en cuenta lo anterior, se realizó una prueba de comparaciones múltiples para evaluar las diferencias significativas entre las medias de los tratamientos, con la cual también se consideró una significancia estadística de $p<0.05$.

3

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En total se realizó el registro y monitoreo durante seis semanas, en cada uno de los lugares seleccionados para cada una de las mallas establecidas. En el predio El Vijal, malla No 1 con un porcentaje de sombra de 80%, el valor promedio de captura de agua correspondió a 25.61 ml/día. En la malla No. 2, con un 65% de sombra, la media aritmética fue de 255,29

ml/día; cabe resaltar que la malla tenía una medida de 2m².

En el predio el Alto Bonito en la malla 3 correspondiente al 80% de sombra el comportamiento promedio de los datos fue de 31,94 ml/día, mientras que en la malla 4 con un porcentaje de sombra de 65% tuvo un valor de 31,61 ml/día, con una media

de mallas de 2 m². Estos datos se recolectaron entre el 6 de abril y el 30 de mayo del año 2022, donde se presentaron precipitaciones promedio 18 ml/día. En la Tabla 1 se muestra que no existe diferencia significativa entre las polisombras.

Con respecto a la Figura 3, se puede observar la cantidad de agua acumulada en

cada polisombra empleada con su respectivo porcentaje. Aunque inicialmente se había planteado que la incidencia del porcentaje de sombra podría afectar la captación de agua. En los resultados obtenidos no se registra una incidencia en la captura de agua con relación a esta.

■ **Tabla 1.** Diferencias significativas entre las polisombras empleadas

Polisombra	Media	Group
0.65	28.5	a
0.8	28.8	a

Nota: en la Tabla 1 se puede evidenciar que no existen diferencias significativas con los diferentes porcentajes de sombra empleados

Fuente: autores.

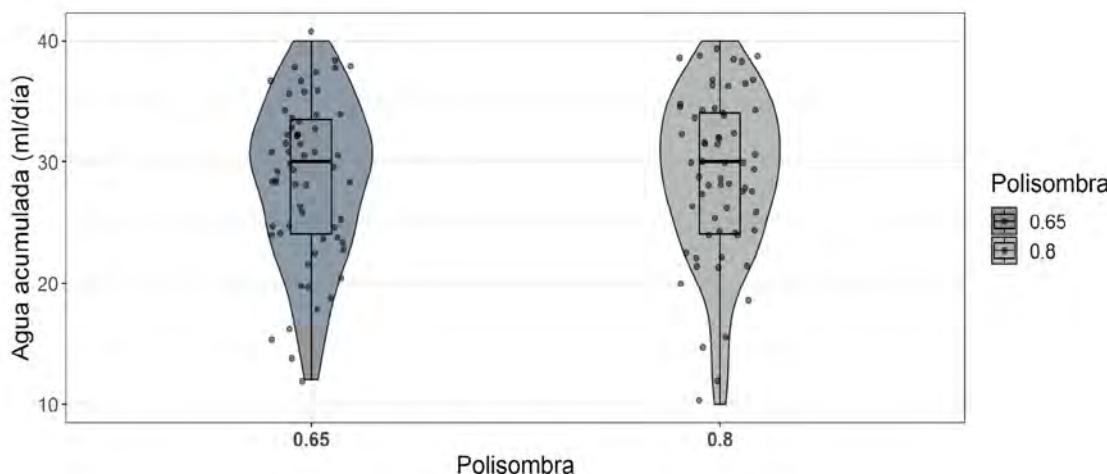


Figura 3. Agua acumulada por porcentaje de polisombra empleado

Nota: en la Figura 3 se presentan los resultados obtenidos con relación a la captura de agua con los diferentes porcentajes de sombra empleados en los predios

Fuente: autores.

Para poder implementar una estructura de acuerdo con las necesidades de sus pobladores se hace necesario ubicar dichas estructuras en zonas con mayor nubosidad. Aun cuando se encuentran algunos estudios sobre la captura de agua mediante la implementación de los atrapanieblas, no se establece en estos casos de estudio información acerca del material empleado, los porcentajes de sombra y el diseño de la estructura con relación a la afectación que puede causar en el proceso de captación. En la gran mayoría de material bibliográfico consultado, por lo general se registra que se emplean materiales de polipropileno pero no la afectación en el proceso de captura (LeBoeuf and de la Jara, 2014; Cereceda *et al.*, 2015; Valjarević *et al.*, 2023). Razón por la que este estudio brinda la oportunidad de iniciar nuevos procesos de investigación sobre este tema.

Cabe señalar y hacer referencia a la investigación de Sánchez (2018), donde se puede comparar que este tipo de estrategia se pueden implementar a mayor escala para generar agua en tiempos de sequía.

En la Tabla 2 se presentan los resultados obtenidos con relación a las diferencias significativas existentes entre los predios. En la Figura 4, se observa que entre las variables agua acumulada (ml/día) y el predio, en el predio de Alto Bonito por polisombra se logró acumular mayor cantidad de agua, gracias a que se condensó mayor cantidad de vapor de agua lo cual se debe a la diferencia de altitud que se presentaba entre ambos predios. Por lo tanto, al comparar ambos lugares, se tiene que factores como la nubosidad, la vegetación circundante y el viento permitieron que ambos sectores presentaran diferentes cantidades de agua capturada.

■ **Tabla 2.** Diferencias significativas existentes entre los predios

Finca	Media	Group
El Vijal	25.5	A
Alto Bonito	31.8	B

Nota: en la Tabla 2 se puede evidenciar que, existen diferencias estadísticas significativas entre los predios, debido al diferencial de altura de estos

Fuente: autores.

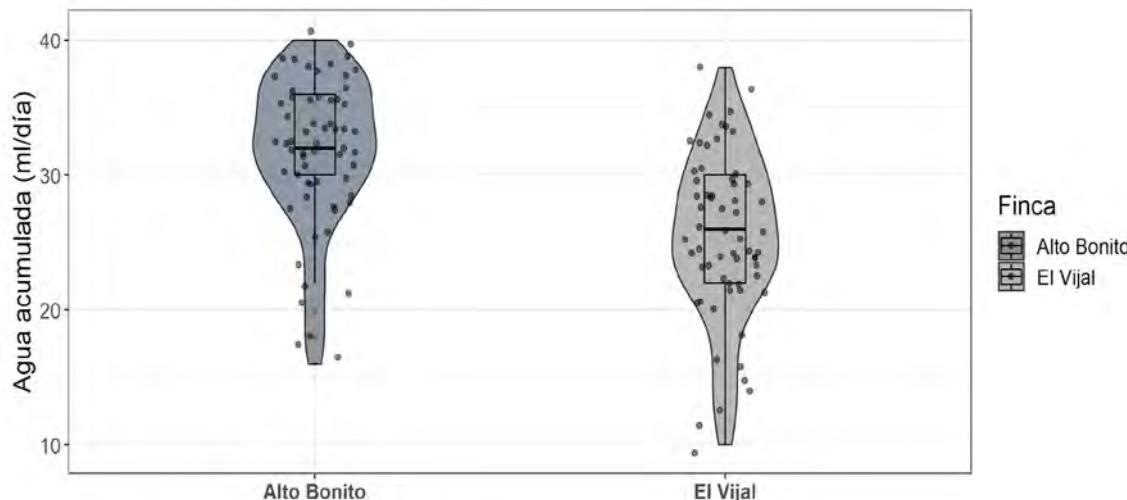


Figura 4. Agua acumulada en cada predio

Nota: en la Figura 4 se presentan los resultados obtenidos con relación a la captura de agua con los diferentes predios

Fuente: autores.

Por lo general el proceso de captación de agua y su posterior almacenamiento van a depender de la nubosidad presente en el momento de la realización del estudio, las fluctuaciones diarias que se puedan presentar tanto en la precipitación como en el viento, en la superficie y la cantidad de atrapanieblas instalados (Morichi *et al.*, 2018). Algunos autores registran que para obtener volúmenes entre 400 m³ a 1000 m³ se requiere de alrededor de 50 estructuras instaladas en la zona de estudio determinada (Cereceda *et al.* 2015). En esta investigación se implementaron cuatro atrapanieblas, ya que se buscaba poder realizar la identificación de cómo afecta el porcen-

taje de la sombra y la altura en el proceso de captación de agua de niebla.

La Figura 5, permite corroborar que, en el predio alto bonito durante el proceso de investigación se logró mayor recolección de agua que en el predio El Vijal. Por lo tanto, se establece que la recolección de agua tiene que ver con la finca y no con el porcentaje de polisombra. Se observa que en el predio Alto Bonito con relación a la polisombra la media acumulada es mayor en 10 ml con respecto al predio El Vijal. Lo cual permite entender que el predio Alto Bonito presenta un potencial para la implementación de esta técnica, debido a

factores como la nubosidad, altitud y velocidad del viento. Por lo tanto, se presenta un valor de desviación muy grande entre el dato de mayor recolección y el dato de menor recolección en El Vijal, esto se debe al efecto que existe en la variación en la altura de los predios. En los estudios

realizados en Perú por Hidalgo Maylle en el año 2021 se encontró que, con un diferencial de altura de 100 m.s.n.m., de los predios se puede capturar entre un promedio de $1.5\text{L/m}^2/\text{día}$ implementando alrededor de 6 estructuras.

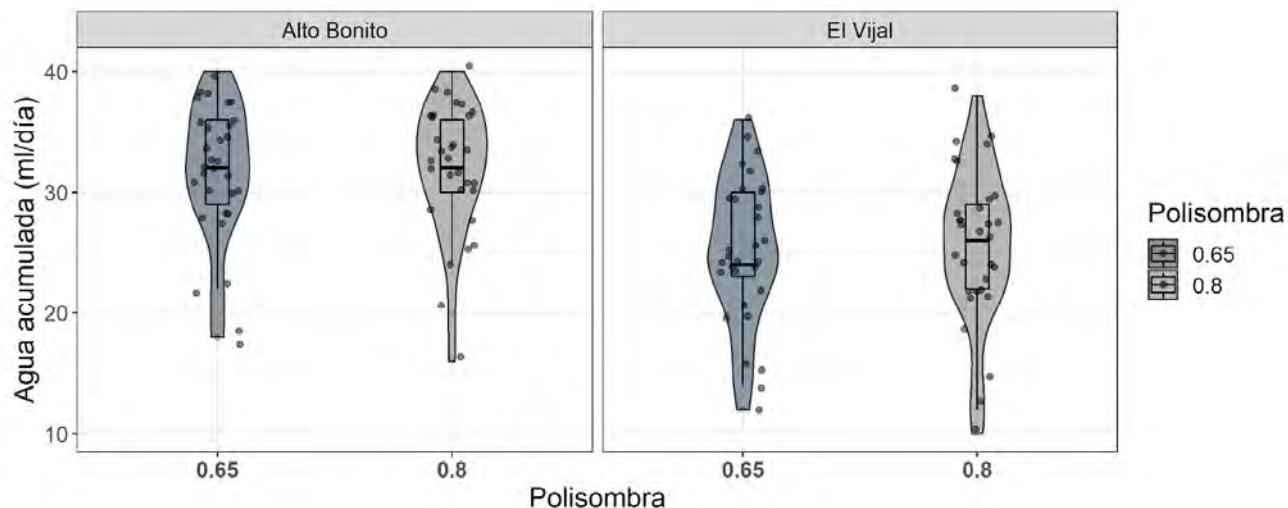


Figura 5. Captura de agua por polisombra en cada uno de los predios

Nota: en la Figura 5 se presentan los resultados obtenidos con relación a la captura de agua con los diferentes porcentajes de polisombra empleados en los distintos predios

Fuente: autores.

Al analizar la Figura 6, se puede afirmar que la sumatoria total en ml por predio fue mayor en el predio Alto Bonito con un valor muy similar en las polisombras empleadas (65% y 80%). Mientras que en el predio El Vijal fue de casi 200 ml por debajo con respecto al otro predio.

De igual forma, se puede decir que no hay mayor diferencia en el agua acumulada con respecto al porcentaje de polisombra, pues se observa que la diferencia es solamente de 10 ml acumulados.

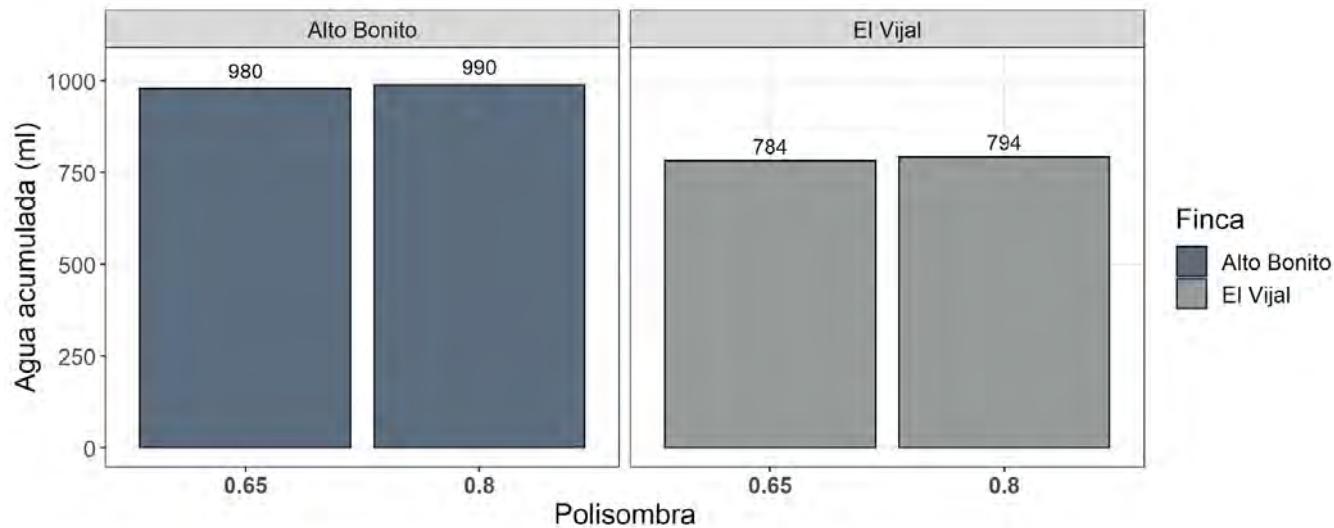


Figura 6. Resumen por finca y polisombra (barras, acumulado)

Nota: en la Figura 6 se presentan el resumen de los resultados obtenidos con relación a la captura de agua con los diferentes porcentajes de polisombra empleados en los distintos predios

Fuente: autores.

De acuerdo con la prueba de Duncan se establece que la variable finca (predios) presenta diferencias significativas generando diferencias en la cantidad de agua recolectada como se muestra en la Figura 7. Se puede afirmar que en el predio El Vijal por día se acumularon en promedio 25.5 ml, mientras que en el predio Alto Bonito se acumuló alrededor de 7 ml más por día, es decir, que existe una diferencia significativa entre los datos obtenidos

en el predio El Vijal y Alto Bonito. En el predio alto bonito se presenta una mayor captura de agua y esto se debe a la variación en la altitud de los predios y a que el lugar en donde se ubican los atrapanieblas en alto bonito estaba más expuesto, esto quiere decir que no contaba con barreras vivas cercanas con las cuales competir por el agua de niebla debido a los procesos de desarrollo antrópico.

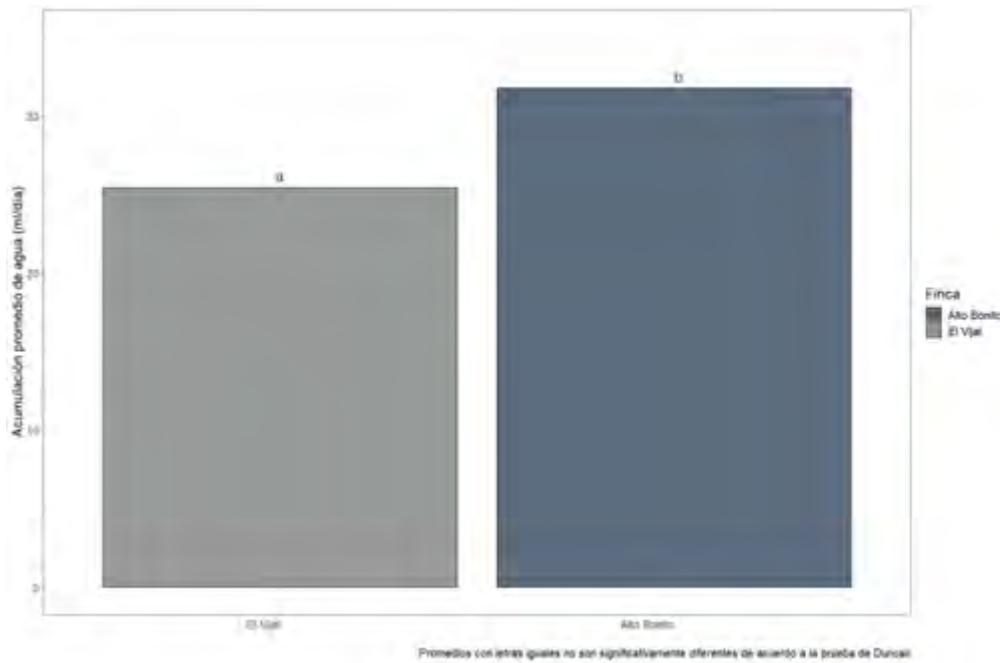


Figura 7. Promedio de agua acumulada por día en cada uno de los predios

Nota: en la Figura 7 se puede observar los resultados de la prueba de Duncan esta indica que existen diferencias significativas entre los predios

Fuente: autores.

Aun cuando los valores obtenidos con relación a la captura de agua en esta investigación son mínimos, en la investigación realizada por Durán (2016) se refuerza la idea de que este tipo de metodología serviría para que la zona media de Tuluá, siempre y cuando se implementen atrapanieblas mucho más grandes que los que se implementaron en la presente investigación, ubicada en el corregimiento de La Iberia, para que pueda hacerle frente a los tiempos de sequía que, según Durán, se presentarán en la década del 50 en el Siglo

XXI. Por otro lado, es importante mencionar y comparar la investigación realizada por López en 1989, con el presente estudio, donde se emplearon también troncos de madera que en este caso provenían de la especie *Guadua Angustifolia* de la familia *Poaceae*) y mallas de 2 x 2 m, las cuales permitieron que las pequeñas partículas de agua se pudieran condensar para su posterior almacenamiento. Sin embargo, las mallas que se emplearon en este caso fueron diferentes a las empleadas en cuanto a los porcentajes de sombra (López *et al.*, 1989).

CONCLUSIONES 4

Existen diferencias significativas en el proceso de captura de agua en lo que tiene que ver con las alturas de los predios en los cuales se establecieron los atrapanieblas. Los porcentajes de la polisombra empleados no presentan diferencias significativas en cuanto a la cantidad de agua capturada.

Se puede establecer que la cantidad de agua almacenada en cada uno de los predios se vio afectada debido a factores como la pérdida de la cobertura vegetal, ya que, en la zona de El Vijal los atrapanieblas se encontraban ubicados cerca de un pequeño bosque. En la zona de Alto Bonito la intervención de las actividades antropológicas como la ganadería y la agricultura generaron que la captación de agua fuese mayor al no tener capa vege-

tal que compitiera por el recurso; la altura generó que se condense con mayor facilidad el agua presente en el ambiente.

La estructura empleada para el aprovechamiento de agua en esta investigación no generó niveles amplios en el proceso de captura de agua para la satisfacción de la demanda hídrica de una persona por día; sin embargo, mediante el correcto almacenamiento y tratamiento del agua capturada se puede emplear para la realización de diferentes actividades domésticas, agrícolas o pecuarias durante períodos de tiempo que varían desde una semana hasta 15 días, que servirían como tanques de reserva, a fin de realizar actividades varias como lavado de ropa, recipientes o implementos de aseo, así como riego de plantas ornamentales o comestibles.

CONTRIBUCIÓN DE LA AUTORÍA ■

Eyder Fabián Jaramillo Arenas: metodología, investigación, análisis de datos y conceptualización. **Giovany Tascón Ortiz:** metodología, investigación, análisis de datos y conceptualización. **Karol Andrea Leal Vásquez:** metodología, investigación, análisis de datos, concep-

tualización, escritura, revisión y edición. **Valentina Lamus Molina:** escritura, borrador original, revisión y edición. **Luisa Fernanda Cabezas Burbano:** escritura, borrador original, revisión y edición. **Vivian Milen Orejuela:** escritura, borrador original, revisión y edición.

■ AGRADECIMIENTOS

Se agradece a los ingenieros Fabián Jaramillo y Giovany Tascón, ya que sin su empeño, dedicación y participación no se habría logrado el desarrollo de la investigación; así como al MSc, Luis Fernando Delgado, por toda la colaboración suministrada.

■ LITERATURA CITADA

Castañeda, F. y Mendoza, B. (2014). *Criterios metodológicos para la definición de sistemas de captación de aguas con base en lluvia horizontal*. [Tesis de pregrado]. Universidad Católica de Bogotá Colombia. <https://repository.ucatolica.edu.co/handle/10983/1748>

Cereceda, P., Hernández, P., Leiva, J. y Rivera, J. (2014). Agua de Niebla, nuevas tecnologías para el desarrollo sustentable en zonas áridas y semiáridas. CORFO Coquimbo, 8-123 <https://docplayer.es/15025512-Editores-pilar-cereceda-pedro-hernandez-jorge-leiva-juan-de-dios-rivera.html>

Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico. (CRA). (2019). *Agenda Regulatoria Indicativa V7*. <https://www.cra.gov.co/sites/default/files/documents/2019-10/ARE-GULATORIA-INDICATIVA-2019-V7.pdf>

Domen, J. K., Stringfellow, W. T., Camarillo, M. K., and Gulati, S. (2014). Fog water as an alternative and sustainable water resource. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 16(2), 235–249. <https://doi.org/10.1007/s10098-013-0645-z>

Durán, M. (2016). El desierto de Atacama en Chile es uno de los lugares más áridos del mundo, su aspecto rocoso y seco son evidencia de que allí el agua escasea. *Revista Universitaria Oyeme UTADEO*, 2(5), 1-2. <https://www.utadeo.edu.co/es/noticia/emisora/emisora-oyeme-ujtl/7451/atrapa-nieblas-la-alternativa-que-combate-la-falta-de-agua>

Fundación Ciudad Verde (SGAP) y Centro Internacional de Agricultura Tropical, Programa (DAPA CIAT). (2011). *Taller “Construcción y socialización de la estrategia de adaptación al cambio climático en la cuenca Tuluá Morales del Valle*

del Cauca priorizando acciones de conservación de fauna vulnerable". https://www.cvc.gov.co/ecopedia/sites/default/files/archivosAdjuntos/estrategia-de-adaptacion-cc-cuenca-tulua-conservacion-2010_0.pdf

Garcidueñas, P. (2018). ¿Qué es un atrapanieblas? *Expok: Comunicación de Sustentabilidad y RSE*. <https://www.expoknews.com/que-es-un-atrapanieblas/>

Huertas, J.P. y Molina, P.A. (2016). *Estudio de prefactibilidad para la posible Implementación de atrapanieblas en el municipio de Ráquira*. [Tesis de pregrado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas de Bogotá-Colombia]. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Hidalgo, F.S. (2021). *Eficiencia del sistema de atrapanieblas con dos tipos de malla raschel para la captación de agua de niebla Lomas de Paraíso 2017*. [Tesis de pregrado]. Universidad Cesar Vallejo de Lima. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/59654>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM. (s.f). *Indicadores*. <http://www.ideam.gov.co/web/agua/indicadores1>

López, J., Canto, W. y Meneses, R. (1989). *Construcción de atrapanieblas*. Biblioteca Digital INIA. <https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/20.500.14001/41799/NR08655.pdf?sequence=1>

LeBoeuf, R., and de la Jara, E. (2014). Quantitative goals for large-scale fog collection projects as a sustainable freshwater resource in northern Chile. *Water International*, 39(4). <https://doi.org/10.1080/02508060.2014.923257>

Madariaga, I.P (2017). Evaluación del potencial de neblina mediante el sistema de atrapanieblas en las lomas de ancón durante el evento del niño, en el distrito de ancón, provincia de lima periodo 2015-2016 [Tesis de pregrado]. Universidad Nacional de Moquegua. http://200.48.160.221/bitstream/handle/UNAM/55/T095_46281694_T.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). *Política Nacional para la gestión integral del recurso hídrico*. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/Politica-nacional-Gestion-integral-de-recurso-Hidrico-web.pdf>

Morichi, G., Calixto, L. B., and Zanelli, A. (2018). Novel Applications for Fog Water Harvesting. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 06(3). <https://doi.org/10.4236/gep.2018.63004>

Organización de las Naciones Unidas [ONU], UN WATER. (2019). *Informe de políticas de ONU sobre el Cambio Climático y el Agua*. UN Water online. https://www.unwater.org/app/uploads/2019/12/UN-Water_Policy-Brief_Water_Climate-Change_ES.pdf

Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cul-

- tura [UNESCO]. (2015). *Conservación de suelos y aguas en América Latina y el Caribe*. FAO. <https://www.fao.org/americas/prioridades/suelo-agua/es/>
- Organización Mundial de la salud [OMS]. (2017). *El informe del Programa Conjunto de Monitoreo, Progress on drinking water, sanitation, and hygiene: Special focus on inequalities, 2000-2017*. <https://www.who.int/es/publications/item/9789241516235>
- Quinche, M. S. (2019). *Evaluación de la Malla Atrapaniebla como Método Alternativo para Mejoramiento de la Oferta Hídrica, sus Usos Potenciales y la Gobernanza del Agua*. [Tesis de pregrado]. Universidad el Bosque. https://repositorio.unbosque.edu.co/bitstream/handle/20.500.12495/2768/Quinche_Bautista_Manuel_Sebasti%C3%A1n_2019.pdf?sequence=1
- Rivera, J. de D. (2011). Aerodynamic collection efficiency of fog water collectors. *Atmospheric Research*, 102(3). <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2011.08.005>
- Sánchez, J. A. (2018). *Atrapanieblas tecnología para el atrapamiento de agua, una experiencia exitosa en el distrito de Villa María del Triunfo, Lima 2018*. [Tesis de pregrado]. Escuela de Postgrado de la Universidad César Vallejo https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/15678/S%C3%A1nchez_CJA.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Secretaría de Desarrollo Agropecuario y Medio Ambiente [SEDAMA]. (2020). *Programa Agropecuario Municipal periodo: 2020–2023*. <https://antiguo.tulua.gov.co/wp-content/uploads/2020/08/PROGRAMA-AGROPECUARIO-MUNICIPIO-TULUA.-2020-2023.pdf>
- Valjarević, A., Algarni, S., Morar, C., Grama, V., Stupariu, M., Tiba, A., and Lukić, T. (2023). The coastal fog and ecological balance for plants in the Jizan region, Saudi Arabia. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 30(1). <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2022.103494>

Conflictos de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

**Licencia de Creative Commons**

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



Fecha de recibido: 26-7-2023

Fecha de aceptado: 15-11-2023

DOI: 10.22490/21456453.7018

INOCULANTES BIOLÓGICOS: OPORTUNIDADES Y DESAFÍOS PARA LA SUSTENTABILIDAD AGRÍCOLA Y BIOECONOMÍA COLOMBIANA. UNA REVISIÓN

BIOLOGICAL INOCULANTS: OPPORTUNITIES AND CHALLENGES FOR AGRICULTURAL SUSTAINABILITY AND COLOMBIAN BIOECONOMY. A REVIEW

Sandra Patricia Montenegro Gómez ¹

Luisa Fernanda Calderón Vallejo ²

Brayan Alexis Parra Orobio ³

¹Doctora en Ciencias- Área de concentración microbiología agrícola, Universidad Nacional Abierta y a Distancia,

Colombia. sandra.montenegro@unad.edu.co

² Magíster en Ingeniería énfasis en Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Colombia. luisa.calderon@unad.edu.co

³ Doctor en Ingeniería, énfasis en Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Universidad Popular del Cesar, Colombia. baparra@unicesar.edu.co

Citación: Montenegro, S., Calderón, L. y Parra, B. (2024). Inoculantes biológicos: Oportunidades y desafíos para la sustentabilidad agrícola y bioeconomía colombiana. Una revisión. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 15(2), 151-179.
<https://doi.org/10.22490/21456453.7018>

■ RESUMEN

Contextualización: el inadecuado uso de fertilizantes minerales solubles genera grandes problemas ambientales, incluyendo emisiones de gases efecto invernadero. Esto se ha pasado por alto durante mucho tiempo por la gran demanda para la producción agrícola global; actualmente se evidencian efectos negativos desde la perspectiva de sustentabilidad, sumando a la coyuntura de precios elevados de agroinsumos.

Vacío del conocimiento: compilar información de bioinsumos registrados como inoculantes biológicos en Colombia facilita el acceso a información específica, requerida por productores interesados en la mitigación del uso de fertilizantes minerales solubles e inclusión de bioinsumos que puedan suplir los requerimientos agrícolas de los cultivos.

Propósito: el objetivo de esta revisión es presentar beneficios edáficos asociados con el uso de inoculantes biológicos microbianos y la oportunidad que representan para la sustentabilidad agrícola y fortalecimiento de la bioeconomía colombiana.

Metodología: se llevó a cabo una revisión sistemática de literatura con parámetros establecidos por PRISMA, con base en información relevante de empresas de inoculantes biológicos en la agricultura colombiana.

Resultados y conclusiones: se identificaron 4910 estudios donde 12 cumplieron con los protocolos de selección. De 393 registros de productos biológicos en Colombia, 119 corresponden a inoculantes biológicos. Desde la perspectiva de bioeconomía y negocios verdes, la exploración y aprovechamiento ecológicamente responsable de la biodiversidad microbiana en Colombia es una oportunidad para disminuir el uso de fertilizantes de síntesis química y encaminar una transición hacia la agricultura sustentable basada en el uso de inóculos biológicos microbianos, como mejoradores de la calidad y salud de suelos agrícolas.

Palabras clave: agricultura, economía alimentaria, fertilizantes minerales solubles, industria de abonos, microbiota del suelo

ABSTRACT

Contextualization: The inappropriate use of soluble mineral fertilizers generates major environmental problems, including greenhouse gas emissions. This has been overlooked for a long time due to the high demand for global agricultural production; currently, negative effects are evident from the sustainability perspective, coupled with the conjuncture of high agro-input prices.

Knowledge gap: Compiling information on bio-inputs registered as biological inoculants in Colombia facilitates access to specific information required by producers interested in mitigating the use of soluble mineral fertilizers. It also facilitates the inclusion of bio-inputs that can supply the agricultural requirements of crops.

Purpose: This review aims to present the edaphic benefits associated with using microbial biological inoculants and the opportunity they represent for agricultural sustainability and the strengthening of the Colombian bioeconomy.

Methodology: A systematic literature review was carried out with parameters established by PRISMA and based on relevant information from biological inoculant companies in Colombian agriculture.

Results and conclusions: A total of 4,910 studies were identified, and 12 met the screening protocols. Of 393 biological product registrations in Colombia, 119 correspond to biological inoculants. From the perspective of bioeconomy and green business, the exploration and ecologically responsible use of microbial biodiversity in Colombia is an opportunity to reduce the use of chemically synthesized fertilizers and to move towards a transition to sustainable agriculture based on the use of microbial biological inoculums to improve the quality and health of agricultural soils.

Keywords: agriculture, fertilizer industry, food economy, soil microbiota, soluble mineral fertilizers

■ RESUMEN GRÁFICO



Fuente: autores, adaptación-ICA (2023).

1 INTRODUCCIÓN

La agricultura juega un renglón muy importante en la proyección empresarial colombiana, sin embargo, en términos de crecimiento agrícola, el precio de los agroinsumos es un factor altamente limitante. De acuerdo con Agronet-Minagricultura (2022). En el año 2022 los precios de fertilizantes simples crecieron un 118,29% y los compuestos en un 101,77 %. Debido a que Colombia es un importador neto, tanto de fertilizantes como de

plaguicidas, el incremento sostenido de su precio a nivel internacional es particularmente preocupante para el desempeño y las perspectivas del sector agrícola. Durante 2021, se importaron cerca de 2,1 millones de toneladas de fertilizantes y 66.423 toneladas de plaguicidas. En efecto, en el caso de los fertilizantes primarios, Rusia (28%), Trinidad y Tobago (22%), China (17%) y EE. UU. (16%) son

los principales países de los que se importan fertilizantes (Corficolombiana, 2022).

De otra parte, debido a la creciente necesidad de compuestos de nitrógeno y fósforo para usos no agrícolas, podría ejercer una presión adicional sobre los precios. No obstante, también hay factores que sugieren que los agricultores pueden utilizar los fertilizantes de forma más flexible y, por tanto, tendrán una mayor capacidad de respuesta a los cambios de precios; al respecto, cada vez son más los mercados que ofrecen posibilidades de comercio, de modo que los fertilizantes orgánicos pueden comprarse y venderse dentro de una región determinada, lo que puede contribuir a compensar los déficits locales de suministros de fertilizantes minerales (FAO, 2022). En este contexto, se requiere de una importante participación de pequeñas, medianas y grandes empresas con iniciativas privadas o de colaboración público-privada en materia de bioeconomía sustentada en aplicaciones biotecnológicas para la agricultura y desarrollo de bioproductos (Rodríguez, A. G. (2017).

Desde la bioeconomía es importante resaltar que, aunque está basada en utilización de recursos biológicos, su uso debe ser sustentado en la conservación de los recursos naturales y la biodiversidad, a fin de ir contrarrestando el daño causado por el uso indiscriminado de fertilizantes minerales solubles, el cual hace parte de los principales contaminantes causantes de diversas enfermedades y daños en la biodiversidad de ambientes acuáticos, aéreos y terrestres (Wohlfahrt *et al.*, 2010; Önder *et al.*, 2011; Alori y Babalola, 2018; Ganguly, 2021). Lo anterior sumado a la contribución de su uso con el 13 % de las emisiones de gases de efecto invernadero, conformadas por óxido nitroso, generado por adición de nitrógeno sintético en el suelo (Cano, Martín, Zarazúa, 2022).

La presente revisión tiene como objetivo caracterizar la oferta comercial colombiana de inoculantes biológicos microbianos asociados con la mejora de la calidad y salud del suelo, como una oportunidad para la sustentabilidad agrícola y fortalecimiento de la bioeconomía colombiana.

MATERIALES Y MÉTODOS 2

Tipo de estudio

Se llevó a cabo una revisión sistemática de literatura de acuerdo con los parámetros establecidos por PRISMA (Preferred

Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analysis), en la cual se incorporaron varios aspectos conceptuales y metodológicos relacionados con la metodología de revisiones sistemáticas que han emer-

gido en los últimos años. La declaración PRISMA incluye una lista de verificación de 27 elementos y un diagrama de flujo de cuatro fases (Page, *et al.*, 2021). La Figura 1 muestra el diagrama de fases con los distintos pasos utilizados en el actual artículo, estructurado con información relevante en temáticas asociadas con empresas de inoculantes biológicos en la agricultura colombiana. A continuación, se relaciona el protocolo de búsqueda y selección.

Identificación

Se realizó una búsqueda sistemática de literatura en las bases de datos ScienceDirect, PubMed y Scielo y otras fuentes incluyendo Google Scholar y páginas institucionales. Se incluyeron títulos de investigaciones bajo los siguientes términos en español e inglés: 1. Bioeconomía,

2. Inoculantes biológicos en Colombia y 3. inoculantes microbianos. En este proceso se eliminaron registros duplicados.

Cribado

Se incluyeron registros con los términos de búsqueda en el título o resumen. En esta fase se excluyeron documentos incompletos, registros con información muy generalizada, enfoque distinto a inóculos microbianos para uso agrícola o con información desactualizada.

Inclusión

Se incluyeron registros con priorización de las variables de título, año, país, producción de bioinsumos agrícolas enfocados a los inóculos microbianos.

3

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se identificaron 4910 registros en total, se cribaron con lectura de título y 3910 cumplieron para decidir su elección de acuerdo con la temática, año y actualización, posteriormente se consideró la inclusión de solo 210 estudios de los cuales 12 publicaciones fueron incluidas por dar cumplimiento al protocolo de la presente revisión (Figura 1). Las doce publicacio-

nes priorizadas han sido realizadas en la última década, enfocadas en el uso de insumos biológicos en algunos cultivos de interés en la bioeconomía colombiana (Agrosavia, 2022). De otra parte, se consideraron estudios de biofertilizantes tipo bioinoculantes microbianos que pueden sustituir o reducir el uso de fertilizantes minerales solubles.

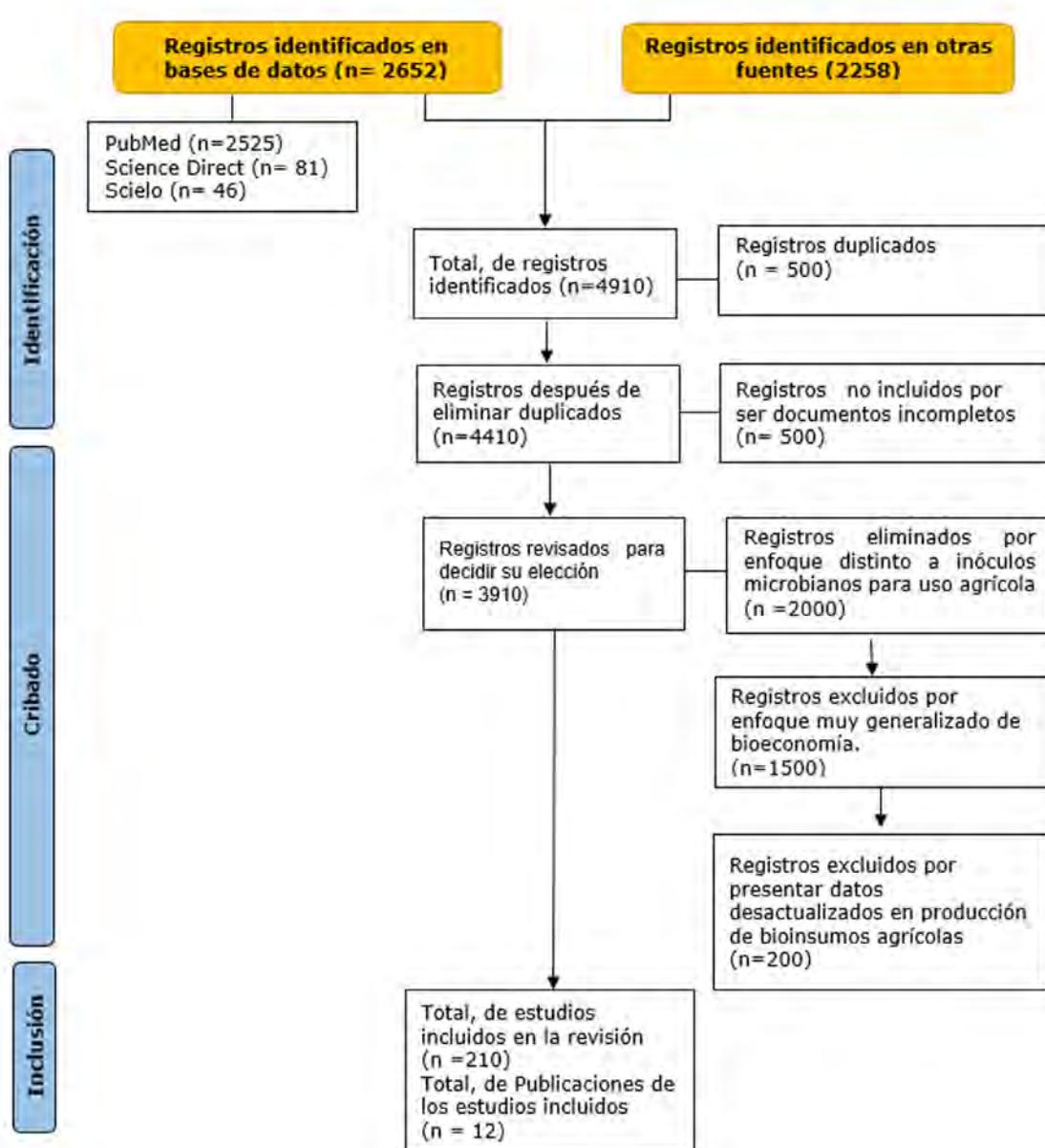


Figura 1. Diagrama de flujo PRISMA de la información a través de las diferentes fases de revisión sistemática de temas asociados a la bioeconomía de empresas productoras de inoculantes biológicos microbianos de uso agrícola en Colombia

Fuente: Adaptado de Page *et al.*, (2021).

Mercado de fertilizantes minerales solubles en Colombia

Los resultados de la presente revisión indican que entre los rubros que componen los costos de producción agropecuaria en Colombia, los insumos (entre fertilizantes y plaguicidas) llegan en algunos casos a representar el 35%, proporción que, asociada a los precios de éstos, se constituyen en factores determinantes de la rentabilidad de las actividades agropecuarias (FAO, 2018).

En Colombia, el mercado de fertilizantes simples se concentra principalmente en la comercialización de urea (fuente de nitrógeno), KCl -cloruro de potasio (fuente de potasio)- y DAP –fósфato diamónico (fuente de fósforo). La mayoría de estos fertilizantes simples no se producen en Colombia, sino que deben ser importados, bien sea para fines de comercialización o para autoconsumo, pues son necesarios para la producción de los fertilizantes compuestos, es decir aquellos que contienen al menos dos macronutrientes básicos (nitrógeno, fosforo, potasio) y en algunas ocasiones son enriquecidos con un elemento adicional (Rodríguez, *et al.*, 2018). El índice de autosuficiencia de fertilizantes en Colombia es del 20%, lo que expone la competitividad del agro colombiano a la volatilidad de los precios internacionales y la tasa de cambio (FAO, 2018). Las importaciones de fertilizantes en Colombia de acuerdo con CVN, (2021) se concentraron, el 69%, en las siguientes empresas:

1. **Yara Colombia S.A.:** es el principal importador con 21% del total, equivalente a USD\$ 131 millones y una variación de -26%.
2. **Monómeros Colombo Venezolanos S.A.:** ingresó 17% de los fertilizantes por USD\$ 107 millones; en su caso, las importaciones crecieron 11%.
3. **Precisagro S.A.S.:** es tercero con USD\$ 101 millones, que representan 16% del total importado, cifra que creció 7% frente a 2019.
4. **Ecofertil S.A.:** compró fertilizantes por USD\$ 47 millones CIF, es decir, ocupa 8% del mercado; su variación fue de 124%, una de las más altas reportadas.
5. **Nutrición de Plantas S.A.:** cierra el top 5 con 6% de participación, representada por USD\$ 39 millones, valor que creció 54% frente al periodo anterior.

Ante la coyuntura de precios elevados de agro-insumos, es relevante considerar esta situación como una oportunidad para fortalecer la competitividad del agro colombiano desde una perspectiva ambiental, además socialmente sustentable, donde la seguridad alimentaria en el país sea primordial para aprovechar la diversidad para el fortalecimiento de la exportación de productos agrícolas hacia consumidores, que hoy demandan productos con menor cantidad de trazas de fertilizantes minerales solubles; en este sentido, los insumos biológicos (biofertilizantes y

bioplaguicidas) se plantean como una promisoria alternativa (Corficolombiana, 2022), ya que los agroinsumos además de generar un impacto negativo en términos económicos, también acarrean problemas ambientales cuando no son usados de acuerdo con los requerimientos del suelo y los cultivos (FAO, 2018). Por lo tanto, se hace necesario generar alternativas de nuevos fertilizantes, como las mezclas mineral-orgánicas combinadas con bioinsumos, con el fin de mejorar la competitividad de la producción.

Inoculantes biológicos como alternativas a la fertilización tradicional

Como alternativas a la fertilización tradicional se deben promover procesos de producción de fertilizantes orgánicos y

estimular la utilización de biofertilizantes, lo que redundará finalmente en incentivar la utilización eficiente y racional de los fertilizantes, disminuir el impacto ambiental y posibilitar la sostenibilidad de los agroecosistemas y los suelos cultivados. Por ejemplo, bioinoculantes, también conocidos como inoculantes microbianos e inoculantes del suelo. Los cuales son productos que contienen concentrados de microorganismos vivos o latentes (bacterias y hongos, solos o combinados) y se agregan a los cultivos para incrementar el suministro y/o disponibilidad de nutrientes, estimular el crecimiento vegetativo y contribuir al control de patógenos de las plantas. Tal como lo indica Guzmán, (2018), existen estudios y experiencias que prueban que los biofertilizantes tipo bioinoculantes, pueden utilizarse para sustituir o reducir el uso de los fertilizantes químicos. (Tabla 1).

■Tabla 1. Algunos estudios de biofertilizantes tipo bioinoculantes microbianos que pueden sustituir o reducir el uso de fertilizantes químicos

Bioinoculante	Efecto en cultivo o el suelo	Fuente
<i>Bradyrhizobium japonicum</i>	Efecto favorable sobre el desarrollo de las raíces de las plantas de soya, mostrando incrementos entre un 3,5 % y un 10,8 % con relación al testigo	Fornasero y Toniutti (2015)
Simbiosis Anabaena y Azolla	<i>Anabaena</i> fija nitrógeno en simbiosis con <i>Azolla</i> , que a su vez contribuye principalmente al cultivo de arroz Proporcionando entre 20-25 kg de nitrógeno fijado por hectárea al año y añadiendo biomasa al suelo	Pathak y Kumar (2016)
Micorriza arbuscular (<i>Rhizoglossum fasciculatum</i>) y hongos solubilizadores de fosfato- <i>Mortierella</i> sp.	Los niveles de fosfato en los brotes de las plántulas de Aguacate (<i>Persea americana Mill. cv. 'Hass'</i>) inoculada con micorrizas fueron significativamente más altos, alcanzando 170.4 y 172.5 mg de P/planta, representando un aumento del doble en comparación con las plantas de control	Tamayo-Vélez y Osorio (2017)
<i>Bacillus, Lactobacillus, Bifidobacterium, Streptococcus, Rhodoseudomonas, Rhodobacter, Saccharomyces</i>	Incrementó la MO (51%), el N (56%) y P disponible en suelo cultivado con maíz forrajero	Ávalos <i>et al.</i> (2018)
Rizobacterias promotoras de crecimiento vegetal, RPCV (<i>Bacillus paralicheniformis</i> y <i>Pseudomonas lini</i>)	Permite reducir la fertilización, sin disminuir el rendimiento y la calidad del cultivo de tomate en condiciones de invernadero	Espinoza <i>et al.</i> (2019)
	El rendimiento se incrementó en las plantas inoculadas y fertilizadas al 75% de la solución nutritiva	
<i>Pseudomonas</i> : Tmt-16, <i>P. gessardi</i> ; Ls-C21, <i>P. koreensis</i> ; Ltj-62, <i>P. brassicacearum</i> y <i>Acinetobacter</i> : LsC-58, <i>A. calcoaceticus</i>	Rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal capaces de mejorar la disponibilidad de NPK. Selección, identificación y efectos sobre el crecimiento del tomate	Reyes <i>et al.</i> (2019)
	Se incrementó el crecimiento de las raíces en 23.57%, mantuvo el mayor contenido de N en tejido vegetal, 2.6%, mayor cantidad de N disponible en el suelo, de 17,0 a 19,0 mg kg ⁻¹ de K disponible	

Abonos orgánicos y biofertilizantes basados en <i>Azotobacter</i> sp.; <i>Glomus cubense</i> .	Mayor crecimiento y vigor a las plantas de <i>Coffea arábica</i> L., incrementando su altura de 180 a 213 cm	Canseco <i>et al.</i> (2020)
Compost inoculado con <i>Klebsiella oxytoca</i>	Compost inoculado con bacterias solubilizadoras de potasio mejorarán el crecimiento y la productividad del maíz en agroecosistemas semiáridos, presentando aumento significativo en la altura de la planta (50%), biomasa de brotes (59%), raíces (73%), longitud de raíces (92%), absorción de K-planta (154%), eficiencia en el uso del agua (54%)	Imran <i>et al.</i> (2020)
Bacillus subtilis y Bacillus megaterium	Bacterias promotoras de crecimiento y solubilización de fosfato: promueven mayor absorción de fosfatos y crecimiento de raíces en cultivo de caña de azúcar aumentando su productividad hasta un 20%	Guilherme (2022)
Biopelículas microbianas de <i>Azotobacter chroococcum</i> o <i>Trichoderma viride</i>	La aplicación de microrganismos en formulación de biopelículas demostró mejorar las actividades enzimáticas de defensa natural en plántulas de algodón	Velmourougane y Prasanna (2023)
Consorcio de dos cepas de rizobacterias: <i>Acinetobacter soli</i> (AU4, RG5) y micorrizas: arbusculares <i>Glomus</i> sp1.	La inoculación en flores de rosa (<i>Rosa rubiginosa</i>) mejoró el establecimiento del portainjerto aumentando el porcentaje en el establecimiento de raíces. consorcio AU4 + RG5 + <i>Glomus</i> sp.1 (90,5%)	Beyene y Tuji (2023)
<i>Bacillus amyloliquefaciens</i>	Respuesta positiva en variables agronómicas evaluadas con <i>Bacillus amyloliquefaciens</i> Bs006, indica que esta bacteria puede ser validada durante la etapa de semillero de uchuva Aumentó longitud de la planta en 34%, tallo y raíz en 59 % y 16 %, biomasa seca de raíz en 178 %, tallo en 161 % y hojas 96 %	Beltrán <i>et al.</i> , (2023)

Fuente: autores con base en literatura científica.

Empresas de bioinsumos en Colombia

En Colombia, los bioinsumos de uso agrícola con fines de comercialización deben estar registrados ante el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA). La Solicitud de Registro de Empresas Productoras de Bioinsumos o Extractos Vegetales de Uso Agrícola pueden realizarla personas naturales o jurídicas; la producción puede ser directa o a través de maquila y son regidas por el ICA (2004) bajo la Resolución 0375 de febrero 27 de 2004.

Hasta el año 2020, el número de empresas de productos biológicos registradas en Colombia muestra que hasta ese año los productores colombianos alcanzaron el 44% de registros, indicando un dominio de entidades internacionales (Gómez, 2022); no obstante, es de destacar el crecimiento nacional teniendo en cuenta que

en el año 2009 había en total 90 compañías registradas y la mayoría eran solo importadoras (González, 2022). Este registro sugiere un potencial para el fortalecimiento de la producción de bioinoculantes desde la producción nacional; a pesar de ello se requiere de diversos tipos de apoyo a nivel técnico y económico, ya que la falta de financiamiento es uno de los principales obstáculos para el incremento de la productividad empresarial en Colombia. Este obstáculo afecta principalmente a pequeños productores, incluyendo el sector agropecuario y emprendedores, ya que los niveles de riesgo son mayores de acuerdo con el CONPES 3866 del 2016 (Departamento Nacional de Planeación de Colombia, 2016). La Figura 2, presenta la distribución de las 230 empresas de productos biológicos registradas en Colombia, de acuerdo con el portafolio de bioproductos de Agrosavia hasta el año 2020.

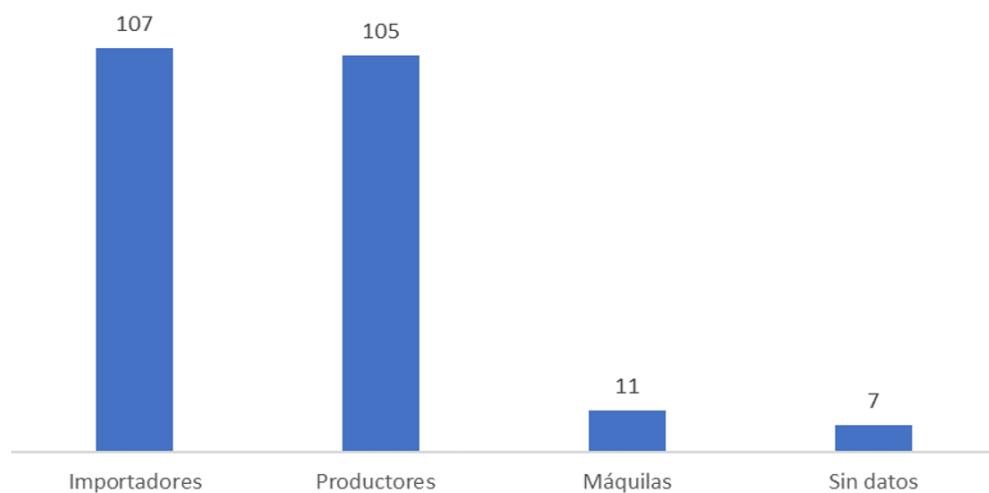


Figura 2. Empresas productoras de insumos agrícolas biológicos registradas en Colombia hasta el año 2020

Fuente: Agrosavia (2020).

En el año 2022, dentro del mercado local, de acuerdo con los datos del ICA, en el país se encuentran 142 registros de empresas de bioinsumos y dentro del total de los 135 alimentos registrados; el arroz, tomate, rosas, café, algodón y soya son los cultivos que reportan el mayor uso de insumos biológicos en el país (Figura 3),

acumulando el 33% de los registros. Por lo tanto, la producción de bioinsumos, concentrada solo en seis cultivos agrícolas, sugiere la necesidad de mayor explotación de la presencia de microorganismos nativos asociados a diversos cultivos de interés agronómico en el país.

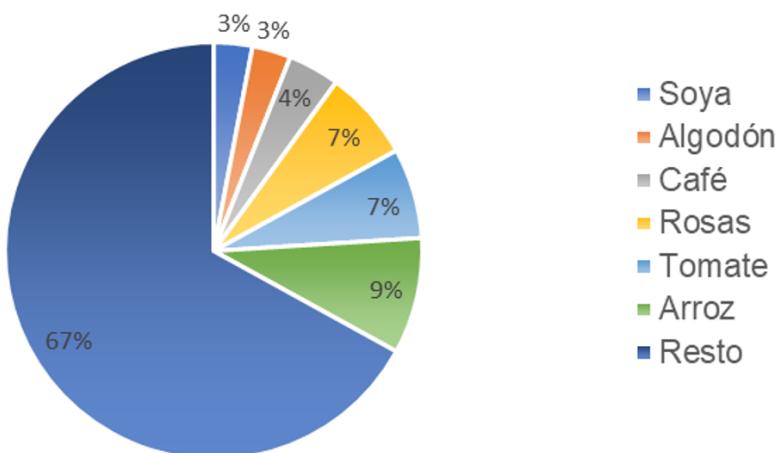


Figura 3. Empresas de bioinsumos registradas en Colombia para algunos cultivos agrícolas

Fuente: Agrosavia (2022).

Empresas de inoculantes biológicos registradas en Colombia

De acuerdo con Resolución 0375 de febrero 27 de 2004, expedida por el ICA, un inoculante biológico es un producto elaborado con base en una o más cepas de microorganismos benéficos que, al aplicarse al suelo o a las semillas, promueve el crecimiento vegetal o favorece el apro-

vechamiento de los nutrientes en asociación con la planta o su rizosfera. Incluye entre otros los productos elaborados con micorrizas, rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal y los géneros *Rhizobium*, *Bradyrhizobium*, *Azotobacter*, *Azospirillum*, *Frankia*, *Beijerinckia*. El consorcio microbiano de un inoculante biológico, puede sustituir parcial o totalmente la fertilización química (Vassilev *et al.*, 2001; Ramírez *et al.*, 2008).

De los 393 registros de productos biológicos en Colombia, 119 (30%) corresponde a inoculantes biológicos: incluyendo 33 promotores de crecimiento vegetal, 19 fijadores de nitrógeno, 19 de micorrizas, 13 son de solubilizadores de fosfatos, 8 Acondicionadores biológicos del suelo, 7 transformadores de materia orgánica, 1 de fijadores de nitrógeno y solubilizadoras de fosfato, 14 biofertilizantes y 5 sin información. En la Tabla 2, se relacionan los nombres comerciales de estos inoculantes y las empresas distribuidoras registradas en Colombia (Gómez, 2022; ICA, 2023), cuya información complementaria podrá consultarse en la página de biofertilizantes y bioinsumos del Instituto Colombiano agropecuario-ICA.

Para la familiarización con la formulación y funcionalidad de los inóculos microbianos mencionados, a continuación, se realiza una descripción general y algunos microorganismos representativos de cada uno.

Microorganismos promotores de crecimiento vegetal: ejercen efectos positivos sobre el crecimiento de las plantas a través de diversos mecanismos como la movilización de nutrientes (P, Zn y Fe) fijación de nitrógeno, producción de fitohormonas, biocontrol de patógenos, producción de ACC-desaminasa, sideróforos, antibióticos, enzimas líticas, resistencia sistémica inducida y la inducción de resistencia contra los estreses (Hakim *et al.*, 2021), algunos referentes son: *Azospirillum brasiliense*, *Azotobacter chroococcum*, *Lactobacillus acidophilus* (ICA,2023).

Fijadores de nitrógeno: microorganismos capaces de fijar nitrógeno atmosférico (N_2), tornarlo disponible y exportarlo por el xilema de las plantas (Döbereiner, Urquia-ga y Boddey, 1996), algunos referentes son: *Azotobacter chroococcum*, *Bradyrhizobium japonicum*, *Rhizobium phaseoli*. (ICA,2023).

Micorrizas: hongos asociados a la absorción de nutrientes de poca movilidad, dentro de los cuales se destaca el macronutriente fósforo (P) y micronutrientes como zinc (Zn) y cobre (Cu). (Borge, Mescoloti, Cardoso, 2016). Algunos referentes son: géneros *glomus spp*, *acaulospora spp*, *entrophora spp*. (ICA,2023).

Solubilizadores de fosfato: microorganismos con capacidad de solubilizar y movilizar hacia las plantas el fosforo que está fijado en el suelo (Jones *et al.*, 1991; Nahas *et al.*, 1994, Estrada, 2015; Bini, Varón, 2016). Algunos referentes son: *Pseudomonas fluorescens*, *Azospirillum brasiliense*, *Bacillus subtilis*, (ICA,2023).

Acondicionadores de suelo: toda sustancia cuya acción fundamental consiste en el mejoramiento de por lo menos una característica física, química o biológica del suelo (ICA, 2003, 2023). Algunos referentes son: *Azospirillum brasiliense*, *Azotobacter Chroococcum*, *Saccharomyces cerevisiae*, (ICA,2023).

Transformadores de materia orgánica: hongos y bacterias que actúan como descomponedores primarios de materia orgánica del suelo (Santos *et al.*, 2008). Algunos referentes son: *Lactobacillus casei*, *Rhodopseudomonas palustris*, *Saccharomyces cerevi-*

siae, (ICA,2023). Por su parte, los biofertilizantes pueden estar conformados por inóculos biológicos constituidos por uno o más microorganismos (Pérez, *et al.*, 2018).

Algunos referentes son: *Azospirillum brasilense*, *Bacillus licheniformis*, *Saccharomyces cerevisiae*, (ICA, 2023).

■ Tabla 2. Inoculantes microbianos registrados ante el ICA (ICA, 2023)

Empresa	Nombre comercial del inoculante microbiano
Promotores de crecimiento vegetal (33)	
Mycros Internacional S.A.S.	INTRO SL MYCROS
Agro Valley S.A.S.	ACTIFOS SL MYCROS
BIOMERK® S.A.S.	BIOMERK®
FMC Colombia S.A.S.	ALICERCE®
Live Systems Technology S.A.S	ECOTERRA SC
Q-BIOL Calidad Biológica S.A.S	BIO 10
Bioquirama S.A.S.	NEMABAC
Bioquirama S.A.S.	PROMOBAC
Bioquirama S.A.S.	POKONIA
ALTEO S.A.S.	PROGREEN SL
Bioquirama S.A.S.	MIXOMITE
BIOMERK S.A.S.	BIOMERK® AG- SP
ALTEO S.A.S.	MYCOFOL SL
FUNDACIÓN DE ASESORÍAS PARA EL SECTOR RURAL, CIUDAD DE DIOS - FUNDASES	AGROGREEN SC
ARTURO ORLANDO MORA JARAMILLO Arturo Orlando Mora Jaramillo biocontrolSemillas Valle S.A.Semillas Valle S.A.	NUTRIBIOL SLBACTOX SL
Semillas Valle S.A.	BT-BIOX SL
Organización Pajonales S.A.S.	TENEBRIONIX SL
Organización Pajonales S.A.S.	ANISILIUM ®
Organización Pajonales S.A.S.	BACILOBACTER®
Organización Pajonales S.A.S.	BIOMETAR
Bioquirama S.A.S.	FITOBAC®
Organización Pajonales S.A.S.	BIOHAR FORTE
Agroadviser S.A.S.	MULTIBACTER
Agroadviser S.A.S.	RESID® MG
BioNexus S.A.S.	MYCOUP®
BioNexus S.A.S.	BAFEX®
BioNexus S.A.S.	AEGIS-P ®
Agroadviser S.A.S	CENTEON MAX®
Bioquirama S.A.S	TRICHOSYM BIO
SAFER AGROBIOLÓGICOS S.A.S.	INTERACTOR®
Biotech Orius S.A.S.	SAFER TERRA LIFE® GR
	BUEN SUELO SC



Fijadores de nitrógeno (19)

Clabe Representaciones Colombianas Ltda.	TERRAVITE-S21
Claberep Ltda.	FERBIOL SOYA
Ferbiagro	BIAGRO LIQUIDO
Distribuidora de Biológicos de Colombia Dibicol Ltda.	BIONITRO SOYA 1
Microagro Ltda.	NITRAGIN ARVEJA
Colinagro S.A.	NITRAGIN FRIJOL
Colinagro S.A.	DIMARGON
Biocultivos S.A.	OROSUELO SC
Biocultivos S.A.	MONIBAC
Corporación colombiana de investigación agropecuaria, CORPOICA	RHIZOBIOL - FRIJOL
Corporación colombiana de investigación agropecuaria, CORPOICA-FUNDACIÓN DE ASESORÍAS PARA EL SECTOR RURAL, CIUDAD DE DIOS FUNDASES DE ASESORIAS PARA EL SECTOR	AZOBAC
Fundación de asesorías para el sector rural, ciudad de Dios -FUNDASES DIBICOL Ltda. AGROSAVIA Corporación colombiana de investigación agropecuaria	RHIZOBIOL ARVEJA
Corporación colombiana de investigación agropecuaria, CORPOICA DIBICOL LTDA	BIAGRO 10
Organización Pajonales S.A.S.	NITROBAC SC
Corporación colombiana de investigación agropecuaria- AGROSAVIA	RHIZOBIOL LIQUIDO
Corporación colombiana de investigación agropecuaria- AGROSAVIA	MONIBAC LIQUIDO
Rizobacter de Colombia S.A.S.	RIZOLIQ TOP® LS
Distribuidora de Biológicos de Colombia Dibicol Ltda.	ENE-2
ALTEO S.A.S.	FIXOR N

Micorrizas (19)

MINERALES EXCLUSIVOS Y CIA S.C.A.	BIOFERT-MEX POLVO
Mycoral Ltda.	Mycoral
Distribuidora Agrícola Agrotécnia S.A.S.	MICORRIZAR
Álvarez Garrido César (HUMOS SAN PIO)	BIOABONO MICORRIZADO
Natural Control S.A.	MICORRIZAGRO
Corporación colombiana de investigación agropecuaria, CORPOICA	MYCOBIOL
Supelano Prada & CIA- SUPPRASupelano Prada & Cia Supra	MICORRIZAS MYCORRIZZ
Soluciones Biotecnológicas y Agroambientales S.A.S Sobiotech S.A.S.	ABONAMOS MICORRIZAS
Perkins Ltda.	MYCOFERT
Fundación San Isidro	BIOMONTE
	NITRAFOS MICORRIZADO 15%
	SAFER MICORRIZAS M.A

Micorrizas (19)

Soluciones Biotecnológicas y Agroambientales S.A.S. Sobiotech S.A.S.	GLUMIX
SAFER AGROBIOLÓGICOS S.A.S.	MICORRIZAS WORLD ORGANIC-BIOFERTMEX GRANULADO
Mezfer de Colombia S.A.S.	BIOFERTMEXSUSPENSION
World Organic S.A.S.	MICORRIZAS CAMPO VERDE
Minerales Exclusivos S.A.	FUNGIFERT®
Minerales Exclusivos S.A.	ABONAMOS MICORRIZAS 300
Agro Discar S.A.S	
Fungifert Biotechnology S.A.S	
Soluciones Biotecnológicas y Agroambientales S.A.S Sobiotech S.A.S.	

Solubilizador de fosfatos (13)

Semillas Valle S.A.	ECCOBIOX SL
FUNDASES-Fundación de asesorías para el sector rural	FOSFORIZ
Biocultivos S.A.	FOSFOBIOL WP
Biocultivos S.A.	FOSFOBIOL SC
Biocultivos S.A.	FOSFOBIOL 1000 WP
Biocultivos S.A.	FOSFOBIOL 1000 SC
Organización Pajonales S.A.S.Rizobacter de Colombia S.A.S.	FOSFOBACTER
Rizobacter de Colombia S.A.S.	RIZOFOS® LS
Compañía internacional de semillas	TROPI RHIZOFLO SL
Grupo Bioserviam S.A.S.	SOIL ACTIVACTOR
Biocultivos S.A.	FOSFOBIOL 100 WP
Biocultivos S.A Biocultivos S.A.	FOSFOBIOL 100 SC
Innovak Colombia S.A.SINNOVAK Colombia S.A.S	BIOFIT RUT

Acondicionadores biológicos del suelo (8)

Fundación de Asesorías para el Sector Rural	AGROPLUS
Soluciones Bacteriales Colombia Ltda. SOLUBACT	BIOSTART WPOROSUELO SC
Biotech Orius S.A.S.	OROSUELO SC
Orius Biotech S.A.S.	DIGESTOR SC
Biotech Orius S.A.S.	BACTOSOIL SC
Biotech Orius S.A.S.	BACTHON SC
Live Systems Technology S.A. "LST S.A"	ECOTERRA WG
Agrobiológicos Planta S.A.S.Agrobiológicos Planta S.A.	TRICHOPLANTA



Transformador de materia orgánica (7)

Insumos Biológicos De Colombia IBICOL S.A.S.	EMAgro
FUNDASES-Fundación de asesorías para el sector rural	EM-INOCULO MICROBIAL PARA COMPOSTAJE
Insumos Biológicos De Colombia IBICOL S.A.S.	PROBIO BALANCE+
BIO-CROP LtdaBIO-CROP LTDA	TROMBO WP
Fundación de asesorías para el sector rural ciudad de Dios- FUNDASES	EM-1 Inoculo Concentrado para Activación
Soluciones biotecnológicas y agroambientales S.A.S.	SOBIO-TMO
“SOBIOTECH S.A.S.”	SUBTILIN SL
Arturo Orlando Mora Jaramillo Biocontrol	

Fijador de nitrógeno, Solubilizador de fósforo (1)

Agro Advance Technology S.A.S.	PHOEBUS FLO
--------------------------------	-------------

Biofertilizantes (14)

Green Biotech Colombia S.A.S	EPhosphoBARVAR – 2
Biodyne Bogotá S.A.S.	BYODYNE® 401
Gestores del Campo S.A.S.	ECOBRINGER BIOFILL
Gestores del Campo S.A.S. FORBIO COLOMBIA S.A.S.	ECOBRINGER BASIFORT
FORBIO COLOMBIA S.A.S.	LALRISE® AZOS SC
FORBIO COLOMBIA S.A.S.	TRICOGENIA
FORBIO COLOMBIA S.A.S.	PHOSBIO
FORBIO COLOMBIA S.A.S.	AZOBIOMAX
FORBIO COLOMBIA S.A.S.	AZODUO
FORBIO COLOMBIA S.A.S.	FORCONTROL PLUS
FORBIO COLOMBIA S.A.S.	NITROBIOFULL
Bana Insumos S.A.S. Zomac	QUANTUM LIGHT
Bana Insumos S.A.S. Zomac	QUANTUM VSC
Bana Insumos S.A.S. Zomac	QUANTUM TOTAL
Bana Insumos S.A.S. Zomac	

Fuente: ICA (2023).

Oportunidades y desafíos de los inóculos microbianos para la producción agrícola colombiana

A continuación, se presentan condiciones del panorama colombiano que pueden ser consideradas como oportunidades relevantes para el fortalecimiento de la producción de bioinsumos agrícolas en el país.

Demanda global: de acuerdo con la experiencia internacional, el proceso de adopción de bioinsumos es de largo plazo y requiere de una adecuada planeación, con incentivos importantes a la investigación y desarrollo de esta alternativa en el país (Pardo y Orbegozo, 2022) y aunque en Colombia se ha incrementado la aprobación de bioinsumos por parte del ICA, hasta el año 2022 este potencial de desarrollo destaca solo entre el 4% o 5% en uso de bioinsumos en la producción agrícola. No obstante, las cifras de BioProtección Global señalan que en Latinoamérica, actualmente, Colombia es el cuarto país que más consume bioinsumos. La mayor parte es de Brasil con el 48,7% del total regional, le sigue México, con 24,7% y Argentina, con 16,4%, más atrás está Colombia, con 4,1% (González, 2022). Estos referentes de países con grandes producciones agrícolas en la región sugieren la necesidad de crecer en la producción de bioinsumos, ya que este tipo de soluciones no son tan afectadas en sus costos de producción, como sí lo son aquellos productos importados que están expuestos a la tasa

de cambio, a las volatilidades por el precio del petróleo, al tema de las cadenas de abastecimiento y escasez de contenedores (González, 2022).

Por su parte, el aumento observado en el uso de insumos biológicos se debe principalmente a la existencia de productos en el mercado; por ejemplo, los productos elaborados por la empresa Biocultivos S.A., una empresa de base tecnológica que surgió de los convenios de investigación y desarrollo, establecidos con el Instituto de Biotecnología de la Universidad Nacional de Colombia –IBUN–, el sector privado y el gremio arrocero. Dentro de este proceso, se logró el desarrollo de los productos Fosfosal SW (*Penicillium janthine-llum*), Fosfosal SC (*Penicillium janthinellum*), Trifesol WP (*Trichoderma viride*) y Trifesol SC (Montoya, 2010; Zambrano *et al.*, 2015).

Biodiversidad y bioeconomía: Global Bioeconomy Summit- GBS, (2018), definió un conjunto de 14 temas de relevancia global para la investigación en bioeconomía y las agendas de políticas, de los cuales hace parte la biodiversidad como recurso y fundamento para la bioeconomía. En Colombia en el gran foro sobre biodiversidad del año 2016, se manifestó que la finalización del conflicto posibilitaría la consolidación de una nueva economía, con mayor provecho de su inmensa riqueza natural, buscando llegar al año 2025 con una bioeconomía basada en la ciencia, la tecnología y la innovación (Rodríguez, 2017).

Respecto a la biodiversidad microbiana, en Colombia es poca la información que

se tiene para contribuir a la bioeconomía agrícola desde el conocimiento funcional de estos organismos; por lo tanto, estudios como el realizado por Criollo *et al.*, (2021), son de gran importancia para fortalecer esta base de conocimiento. El estudio en mención registra una Colección de microorganismos con Interés en Biofertilizantes (cmib), conformada por 353 accesiones bacterianas y 25 accesiones de hongos formadores de micorrizas arbusculares (hfma). Al respecto Agrosavia, bioprospecta que los microorganismos que conforman la colección sean utilizados como principios activos para el desarrollo de inoculantes biológicos (Rúgeles *et al.*, 2021). Algunas de las accesiones de la cmib fueron colectadas en 16 departamentos del país, a partir de 1976, lo cual es de gran valía por tratarse de microorganismos nativos, ya que las plantas y los microorganismos nativos amplifican los efectos positivos de inoculantes microbianos (Li *et al.*, 2023). En consecuencia, la bioprospección de microorganismos nativos es de suma importancia, ya que la aplicación de inoculantes microbianos del suelo como biofertilizantes y biopesticidas en la agricultura aún son limitados por factores relacionados con su formulación, método de aplicación y la falta de suficiente conocimiento sobre el impacto y las interacciones entre los inoculantes microbianos con el suelo nativo y microbiomas hospedantes de plantas (Vassilev y Malusà, 2021).

Bioeconomía y planeación nacional: Global Bioeconomy Summit- GBS, (2018), indica que la bioeconomía se basa en la

producción, utilización y conservación de los recursos biológicos, con el objetivo de avanzar hacia una economía sostenible. Para apalancar los fondos públicos y apoyar la transferencia de conocimientos se recomienda una colaboración multilateral e intersectorial en proyectos de I + i + D en bioeconomía, con objetivos comunes, entre ellos: aplicaciones en salud, alimentos y temas ambientales desarrollados a partir de microorganismos (Council, 2018). Argentina, Colombia y Ecuador han tomado el liderazgo regional en el desarrollo de estrategias dedicadas a la bioeconomía, en materia de producción de bioenergía, desarrollo de aplicaciones biotecnológicas para la agricultura y desarrollo de bioproductos, con una importante participación de pymes.

En diversos foros se ha reconocido el potencial de la bioeconomía para los países de la región; pero se reconoce también que su aprovechamiento puede verse obstaculizado por factores como i) la falta de marcos regulatorios adecuados; ii) marcos normativos inadecuados y desarticulados; iii) insuficiente coordinación de las capacidades científicas y tecnológicas existentes; iv) restricción a la entrada en el mercado de las Pymes de bioeconomía; y v) falta de financiamiento para la creación de empresas innovadoras de bioeconomía; políticas para las PYME bioeconómicas destinadas a crear capacidades, facilitar la entrada en mercados concentrados y proporcionar financiación adecuada para emprendimientos innovadores (Rodríguez, 2017).

En Colombia las Bases del Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026 (Departamento Nacional de Planeación, 2023), proyectan diversos modelos de bioeconomía basada en el conocimiento y la innovación entre estos, los modelos de producción sostenible y regenerativos en agricultura y ganadería, donde se adoptará la ley de agroecología e iniciar la transición de agricultura convencional hacia la producción agroecológica para aumentar la productividad del suelo, reducir la degradación ambiental y aumentar la resiliencia climática, para ello se promoverán la producción y utilización de bioinsumos (sustitución de agrotóxicos) en el marco del Programa Nacional de Agroecología.

Negocios verdes: por medio del Plan Nacional de Negocios Verdes 2022-2030, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, busca impulsar y promover los negocios verdes, los cuales incluyen actividades económicas con oferta de bienes o servicios generadores de impactos positivos en indicadores sociales, ambientales y económicos. Colombia en este aspecto tiene compromisos adquiridos dentro de la agenda global y articulación con Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Para ingresar al grupo económico de los negocios verdes, existen tres tipologías, las cuales, sin excepción, deben cumplir con los criterios de los negocios verdes y se clasifican de acuerdo con un historial de existencia en tres tipologías

❖ **Emprendimientos verdes:** negocios en etapa de gestación. Estas iniciativas son por lo general unipersonales, co-

munitarias, asociativas y de microempresas.

- ❖ **Negocios verdes avalados:** negocios conformados que cuentan con operaciones comerciales, el dominio de este mercado se sustenta en las MiPyMEs, las cuales conforman un grupo de empresas con mayor contribución en la generación de empleos e ingresos.
- ❖ **Anclas verdes:** negocios que homologan certificaciones de sostenibilidad, ya están consolidados e incorporan otros negocios verdes en sus redes de suministro y cadenas de valor en general. De este grupo hacen partes medianas y grandes empresas que ya tienen una posición en el mercado nacional e internacional (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, *et al.*, 2022).

Dentro de los negocios verdes, los inóculos microbianos en calidad de bioinsumos agrícolas se articulan a la categoría de bioproductos y servicios sostenibles, subcategoría 1: Agrosistemas sostenibles y actividad productiva de la Agricultura orgánica, Agroecología y Agricultura sostenible. Subcategoría 2: Biotecnología y actividad productiva basada en productos de la biotecnología.

Entre los desafíos, se espera que los inoculantes biológicos microbianos registrados ante el ICA, logren hacer parte de las cifras proyectadas para 2030, (MINCIENCIAS, 2020), donde se plantea llegar a este año con más de 500 bioproductos que incluyan nuevos principios activos, bioproductos en etapas pre-comerciales y comer-



ciales y ampliaciones de registros a nuevos mercados nacionales e internacionales.

En particular para el fortalecimiento de inóculos biológicos microbianos, se requiere aumentar la investigación que permita demostrar la eficacia de estos productos en diferentes especies vegetales y

además indicadores que demuestren que es un producto sustentable en concordancia con la categoría de bioproductos y servicios sostenibles proyectados en el Plan Nacional de Negocios Verdes, 2022-2030, que además se articula con la agenda global y Objetivos del Desarrollo Sostenible.

4 CONCLUSIONES

Desde la perspectiva de la bioeconomía y negocios verdes, la exploración y aprovechamiento ecológicamente responsable de la biodiversidad microbiana en Colombia, representa una oportunidad para disminuir el uso de fertilizantes minerales solubles y encaminar una transición hacia la agricultura sustentable complementada con el uso de inóculos biológicos microbianos, como mejoradores de la calidad y salud de suelos agrícolas; tal como lo refleja la

colección de microorganismos con Interés en Biofertilizantes (cmib), conformada por 353 accesiones bacterianas y 25 accesiones de hongos formadores de micorrizas arbusculares (hfma), para lo cual

Agrosavia en la publicación de Rúgeles *et al.*, (2021), bioprospecta que los microorganismos que conforman la colección sean utilizados como principios activos para el desarrollo de inoculantes biológicos

Por lo tanto, el adecuado uso de los 119 inoculantes biológicos registrados que a su vez hacen parte de 293 bioinsumos con registro ICA hasta el 2023, será de gran valía en términos de producción sustentable para fortalecer la confianza de uso en la productividad agrícola y contribuir con las expectativas gubernamentales de alcanzar 500 bioproductos para el año 2030, donde se espera que los inóculos microbianos logren posesionarse en la preferencias de los productores agrícolas colombianos.

CONTRIBUCIÓN DE LA AUTORÍA ■

Sandra Patricia Montenegro Gómez: investigación, conceptualización, escritura. **Luisa Fernanda Calderón Vallejo:** investigación, análisis de datos, escri-

tura, revisión y edición. **Brayan Alexis Parra Orobito:** investigación, revisión y edición.

AGRADECIMIENTOS ■

Los autores agradecen a la Universidad Nacional Abierta y a Distancia y a la Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente por la aprobación del proyecto: “Gestión en innovación sistémica de servicios sostenibles en un sector PYME del Valle del Cauca”. A la Universi-

dad Popular del Cesar seccional Aguachica, por brindar el apoyo para la escritura de este artículo, en el marco del proyecto de semilleros de investigación “Digestión anaerobia de biomasa residual como alternativa tecnológica para la generación de subproductos con valor agregado”.

LITERATURA CITADA ■

Agronet-Minagricultura. (2022). Precios de los insumos agropecuarios comenzaron a estabilizarse durante julio del 2022. *Agronet*. <https://www.agronet.gov.co/Noticias/Paginas/Precios-de-los-insumos-agropecuarios-comenzaron-a-estabilizarse-durante-julio-del-2022.aspx>

Alori, E. T., and Babalola, O. O. (2018). Microbial inoculants for improving crop quality and human health in Africa. *Frontiers in microbiology*, 9, 2213. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.02213>

Ávalos, M. A., Figueroa, U., García, J., Vázquez, C., Gallegos, Miguel A. y Orona, I. (2018). Bioinoculantes y abo-

nos orgánicos en la producción de maíz forrajero. *Nova scientia*, 10(20), 170-189. <https://doi.org/10.21640/ns.v10i20.1285>

Beltrán-Acosta, C. R., Zapata-Narváez, Y. A., Millán-Montaño, D. A. y Díaz-García, A. (2023). Efecto de *Bacillus amyloliquefaciens* y *Pseudomonas migulae* sobre el crecimiento de plántulas de uchuva (*Physalis peruviana* L.) en semillero: Rizobacterias promotoras en plántulas de uchuva (*Physalis peruviana* L.). *Agronomía Mesoamericana*, 34(1), 50669-50669. <https://doi.org/10.15517/am.v34i1.50669>

Beyene, B. B., and Tuji, F. A. (2023). Inoculation of rose (*Rosa rubiginosa* L., eglantine or the briar rose) flower root stocks with consortia of endophytic bacteria and arbuscular mycorrhizal fungi improves its establishment and success rate under greenhouse conditions. *Rhizosphere*, 26, 100698. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2023.100698>

Bini, D., Varón, M. (2016). Transformações microbianas do fósforo. En *Microbiologia do solo*. (2^a Edição, pp. 149-161). Universidade de São Paulo https://www.esalq.usp.br/biblioteca/sites/default/files/Microbiologia_solo.pdf

Cano, B. M., Martín, G., and Zarazúa, S. (2022). Microorganismos benéficos o agroquímicos. *Elementos*, 128, 57-63. <https://elementos.buap.mx/directus/storage/uploads/00000007824.pdf>

Centro Virtual de Negocios. (CVN (2021)). *Importación de fertilizantes en Colombia*

superó los 620 millones de dólares en 2020. CVN. <https://cvn.com.co/admncvn/importacion-de-fertilizantes-en-colombia-supero-los-620-millones-de-dolares-en-2020/>

Corficolombiana. (2022). Bioinsumos: panorama y oportunidades para el agro colombiano. *Sectores y sostenibilidad, Perspectiva sectorial: agroindustria*. Corficolombiana. <https://investigaciones.corficolombiana.com/documents/38211/0/2022-08-23%20Perspectiva%20Sectorial%20-%20Agroindustria%20bioinsumos2.pdf/b70b971d-0923-a695-9b37-717ca1298a79>

Council, G. B. (2018). *Comunicado Cumbre Global de Bioeconomía 2018: Innovación en la Bioeconomía Global para la Transformación Sostenible e Inclusiva y el Bienestar*. Global Bioeconomy Summit 2018. https://gbs2020.net/wp-content/uploads/2021/10/Comuniqu%C3%A9%C81GBS2018_final_Spanish.pdf

Criollo-Campos, P. J., Pérez-Moncada, U. A., Estrada-Bonilla, G. A., y Buitrago, R. R. B. (2021). Colección de Microorganismos con Interés en Biofertilizantes (cmib). *Conservación y manejo*. Agrosavia. https://www.researchgate.net/profile/German-Estrada-Bonilla/publication/356613095_Coleccion_de_Microorganismos_con_Interes_en_Biofertilizantes_cmib/links/61a4f62b8c253c45f695ef41/Coleccion-de-Microorganismos-con-Interes-en-Biofertilizantes-cmib.pdf

Departamento Nacional de Planeación de Colombia. (DNP). (2016). CONPES 3866 del 2016. *Política Nacional de Desarrollo Productivo*. DNP <https://colaboracion.dnp.gov.co/cdt/Conpes/Econ%C3%B3micos/3866.pdf>

Departamento Nacional de Planeación. (DNP). (2023). Bases Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026. DNP. chrome-extension: / / efaidnbmnnibpcajpcgclefindmkaj / <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/portalDNP/PND-2023/2023-03-17-bases-plan-nacional-desarrollo-web.pdf>

Dobereiner, J., Urquiaga, S., and Boddey, R. M. (1996). Alternatives for nitrogen nutrition of crops in tropical agriculture. In *Nitrogen Economy in Tropical Soils: Proceedings of the International Symposium on Nitrogen Economy in Tropical Soils, held in Trinidad, WI, January 9–14, 1994* (pp. 338-346). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-009-1706-4_32

Espinosa-Palomeque, B., Cano-Ríos, P., Salas-Pérez, L., García-Hernández, J. L., Preciado-Rangel, P., Sáenz-Mata, J., y Reyes-Carrillo, J. L. (2019). Bioinoculantes y concentración de la solución nutritiva sobre la producción y calidad de tomate. *Biotecnia*, 21(3), 100-107. <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v21i3.1038>

Estrada, B. G. A. (2015). *Efeito da inoculação de bactérias mobilizadoras de fósforo na compostagem e no desenvolvimento da cana-de-açúcar*. [(Doctoral dissertation,

Universidade de São Paulo]. https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11140/tde-29092015-164939/publico/German_Andres_Estrada_Bonilla_versao_revisada.pdf

Fornasero, L.V, y Toniutti, M.A. (2015). Evaluación de la nodulación y rendimiento del cultivo de soja con la aplicación de distintas formulaciones de inoculantes. *Fave. Sección ciencias agrarias*, 14(1) <https://doi.org/10.14409/fa.v14i1/2.5708>

Ganguly, R. K., Mukherjee, A., Chakraborty, S. K., and Verma, J. P. (2021). Impact of agrochemical application in sustainable agriculture. In *New and Future Developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering* (pp. 15-24). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-446-64325-4.00002-X>

Gómez, M.I. (2022) *Bioproductos: Enfoque de Agrosavia*. DNP. https://www.dnp.gov.co/LaEntidad/_misiones/mision-crecimiento-verde/Documents/Comite%20Sostenibilidad/Presentaciones/Sesi%C3%B3n%202010/1_Desarrollo_bioinsumos_agr%C3%ADcolas_Colombia_Agrosavia.pdf

González X. (2022). *Foco en Colombia: industria de bioinsumos busca cerrar las brechas*. *Biologicals Latam*. Biological LATAM. <https://biologicalslatam.com/issue-06/foco-en-colombia-industria-de-bioinsumos-busca-cerrar-las-brechas/>

Guilherme, V. (2022). *Novo bioinsumo aumenta em até 20% a produtividade da cana-de-açúcar*. Embrapa noti-

cias. <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/77086074/novo-bioinsumo-aumenta-em-ate-20-a-produtividade-da-cana-de-acucar>

Guzmán., J. (2018). *Fertilizantes químicos y biofertilizantes en México*. Reporte de Investigación. chrome-extension://efaidnbmnnibpcapcglclefindmkaj/<https://es.scribd.com/document/442848368/Fertilizantes-quimicos-y-biofertilizantes-en-Mexico>

Hakim, S., Naqqash, T., Nawaz, M. S., Laraib, I., Siddique, M. J., Zia, R., ... and Imran, A. (2021). Rhizosphere engineering with plant growth-promoting microorganisms for agriculture and ecological sustainability. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 617157. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.617157>

Imran, M., Shahzad, S. M., Arif, M. S., Yasmeen, T., Ali, B., and Tanveer, A. (2020). Inoculation of potassium solubilizing bacteria with different potassium fertilization sources mediates maize growth and productivity. *Pak. J. Agric. Sci.*, 57, 1045-1055. <https://www.semanticscholar.org/paper/INOCULATION-OF-POTASSIUM-SOLUBILIZING-BACTERIA-WITH-Imran-Shahzad/9c181e5fc41d7047e02ca5c6e65c-314ddb3b3338>

Instituto Colombiano Agropecuario. (ICA). ICA (2023). Listado de Productos Bioinsumos registrados. ICA. <https://www.ica.gov.co/getdoc/a5c149c5-8ec8-4fed-9c22-62f31a68ae49/fertilizantes-y-bioinsumos-agricolas.aspx>

Instituto Colombiano Agropecuario. (ICA). ICA (2004). *Resolución 0375 de febrero 27 de 2004. Por la cual se dictan las disposiciones sobre Registro y Control de los Bioinsumos y Extractos Vegetales de uso agrícola en Colombia*. ICA. <https://www.mincit.gov.co/getattachment/0b26d8aa-9460-41d8-b176-b2c976986d72/Resolucion-375-del-27-de-febrero-de-2004-Por-la-cu.aspx#:~:text=Documento%20oficial%20expedido%20por%20el%20ICA%2C%20mediante%20el%20cual%20se,conformidad%20con%20las%20regulaciones%20vigentes.>

Instituto Colombiano Agropecuario. (ICA). (2003). *Resolución 00150, por la cual se adopta el Reglamento Técnico de Fertilizantes y Acondicionadores de Suelos para Colombia*. ICA. <https://www.ica.gov.co/areas/agricola/servicios/fertilizantes-y-bio-insumos-agricolas/resolucion-150-de-2003-1-1.aspx>

Instituto Colombiano Agropecuario. (ICA). ICA (2023, abril). *Acondicionador del suelo*. ICA. <https://www.ica.gov.co/archivo-tramites/glosario/a/acondicionador-del-suelo>

Jones, D., Smith, B. F. L., Wilson, M. J., and Goodman, B. A. (1991). Phosphate solubilizing fungi in a Scottish upland soil. *Mycological Research*, 95(9), 1090-1093. [https://doi.org/10.1016/S0953-7562\(09\)80553-4](https://doi.org/10.1016/S0953-7562(09)80553-4)

Li, C., Jia, Z., Ma, S., Liu, X., Zhang, J., and Müller, C. (2023). Plant and native microorganisms amplify the positive effects of microbial inoculant. *Microorganisms*, 11(3), 570. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11030570>

Martínez, D., Villegas, Y., Castañeda, E., Carrillo, J., Robles, C. y Santiago, G. (2020). Respuesta de *Coffea arabica* L. a la aplicación de abonos orgánicos y biofertilizantes. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 11(6), 1285-1298. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i6.2612>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, BID, Biontropic, Corporación Biocomercio Sostenible. (2022). *Plan Nacional de Negocios Verdes 2022-2030*. Minambiente. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/11/Actualizacion-Plan-Nacional-Negocios-verdes-2022-2030.pdf>

Ministerio de Ciencia Tecnología e Innovación. (Minciencias). (2020). *Bioeconomía para una Colombia Potencia viva y diversa: Hacia una sociedad impulsada por el conocimiento*. Minciencias https://minciencias.gov.co/sites/default/files/upload/paginas/bioeconomia_para_un_crecimiento_sostenible-qm_print.pdf

Nahas, E., Centurión, J. F., and Assis, L. C. (1994). Efeito das características químicas dos solos sobre os microrganismos solubilizadores de fosfato e produtores de fosfatases. *Revista Brasileira de Ciencia do solo*, 18(1), 49-53.

Önder, M., Ceyhan, E., and Kahraman, A. (2011). Effects of Agricultural Practices on Environment International Conference on Biology, Environment and Chemistry Singapore: IACSIT Press, 24.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (FAO). (2018). *Be the solution to soil pollution on outcome document of the global symposium on soil pollution*. FAO <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/d535b50b-58f3-4870-85d8-aa5e90ee5803/content>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (FAO). (2022). *El mercado mundial de fertilizantes: balance de la situación de un mercado en dificultades*. FAO. <https://www.fao.org/3/ni280es/ni280es.pdf>

Page, M.J., McKenzie, J.E., Matthew J.P., McKenzie, J.E., Bossuyt, P.M., Boutron, I., Hoffmann, T.C., Mulrow, C.D., Shamseer, L., Tetzlaff, J.T., Akl, E.A., Brennan, S.E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J.M., Grimshaw, J.M., Hróbjartsson, A., Lalu, M.M., Li, T., Loder, E.W., Wilson, E.M., McDonald, S., McGuinness, L.A., Stewart, L.A., Thomas, J., Tricco, A.C., Welch, V.A., Whiting, P., Moher, D. (2021). Declaración PRISMA 2020: una guía actualizada para la publicación de revisiones sistemáticas. *Rev. Esp. Cardiol.*, 74(9), 790-799. <https://doi.org/10.1016/j.recesp.2021.06.016>

Pardo, J., C.; Orbegozo, M., C. (2022, agosto). *Bioinsumos: Panorama y oportunidades para el agro colombiano*, infor-

me detallado. Corficolombiana. <https://investigaciones.corficolombiana.com/documents/38211/0/2022-08-23%20Perspectiva%20Sectorial%20-%20Agroindustria%20bioinsumos2.pdf/b70b971d-0923-a695-9b37-717ca1298a79>

Pathak, D. V., and Kumar, M. (2016). Microbial inoculants as biofertilizers and biopesticides. *Microbial Inoculants in Sustainable Agricultural Productivity, 1 Research Perspectives*, 197-209. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2647-5_11

Ramírez, G., M.; Roveda, H., G.; Bonilla, B. R.; Cabra, J., L.; Peñaranda, R., A.; López, J., M.; Serralde, D., P.; Tamayo, V., A.; Navas, R., G., E.; Díaz, D., C., A. (2008). *Uso y manejo de biofertilizantes en el cultivo de uchuva*. Corpoica. <https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/12852>

Reyes-Castillo, A., Gerding, M., Oyarzúa, P., Zagal, E., Gerding, J., and Fischer, S. (2019). Plant growth-promoting rhizobacteria able to improve NPK availability: selection, identification, and effects on tomato growth. *Chilean journal of agricultural research*, 79(3), 473-485. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-58392019000300473>

Rodríguez O., D., P.; Lugo R., C., y Bejarano, M., F. (2018). *El mercado mundial de fertilizantes: balance de la situación de un mercado en dificultades Estudio sobre el mercado de fertilizantes inorgánicos en Colombia (2009–2018)*. SIC. <https://www.sic.gov.co/sites/default/files/files/>

[Proteccion_Competencia/Estudios_Economicos/Mercado%20Fertilizantes%20Organicos%20en%20Colombia.pdf](#)

Rodríguez, A. G. (2017). *La bioeconomía: oportunidades y desafíos para el desarrollo rural, agrícola y agroindustrial en América Latina y el Caribe*. CEPAL. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/42724-la-bioeconomia-oportunidades-desafios-desarrollo-rural-agricola-agroindustrial>

Rugeles, L. A., Cañar, D. Y., Tibaduiza, L. P., Jiménez, H. R., González, C., Estrada, G. A., ... y López, D. E. (2021). Conservación y manejo de la diversidad microbiana en los bancos de germoplasma para la alimentación y la agricultura en Colombia (pp. 66-84). *Colección de Microorganismos con Interés en Biofertilizantes (cmib)*. Agrosavia. https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/36935/Ver_Documento_36935.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Sánchez, G., Uribe, M. (2013). *Avances en biotecnología: Panorama y perspectivas*. Sánchez, G., Uribe, M. (2013). *El desafío de generar tecnología en el siglo XXI. La propiedad intelectual en el devenir histórico de Colombia. Cátedra Manuel Ancizar. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. UNAL*. 181-201.

Santos, G.A., Silva, L.S., Canellas, L.P. y Camargo, F. (2008). *Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais*.

cais e subtropicais. Segunda edição, Editora Metrópole.

Tamayo-Vélez, A., and Osorio, N. W. (2017). Co-inoculation with an arbuscular mycorrhizal fungus and a phosphate-solubilizing fungus promotes the plant growth and phosphate uptake of avocado plantlets in a nursery. *Botany*, 95(5), 539-545. <https://doi.org/10.1139/cjb-2016-0224>

Vassilev, N., and Malusà, E. (2021). microorganisms and plant nutrition. *Microorganisms*, 9(12), 2571. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9122571>

Vassilev, N., Vassileva, M., Azcon, R., and Medina, A. (2001). Application of free and Ca-alginate-entrapped *Glomus deserticola* and *Yarrowia lipolytica* in a soil-plant system. *Journal of Biotechnology*, 91(2-3), 237-242. [https://doi.org/10.1016/S0168-1656\(01\)00341-8](https://doi.org/10.1016/S0168-1656(01)00341-8)

Velmourougane, K., and Prasanna, R. (2023). Trichoderma-Azotobacter Biofilm-Based Formulation Enhance Natural Plant deFense Enzyme Activities in Wheat and Cotton Seedlings. *National Academy Science Letters*, 1-4. <https://doi.org/10.1007/s40009-023-01324-w>

Wohlfahrt, J., Colin, F., Assaghir, Z., and Bockstaller, C. (2010). Assessing the impact of the spatial arrangement of agricultural practices on pesticide runoff in small catchments: combining hydrological modeling and supervised learning. *Ecol. Indic.* 10, 826–839. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2010.01.004>

Zambrano-Moreno, D. C., Ramón-Rodríguez, L. F., Strahlen-Pérez, V. y Bonilla-Buitrago, R. R. (2015). Industria de bioinsumos de uso agrícola en Colombia. *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, 18(1), 59-67. <https://doi.org/10.31910/rudca.v18.n1.2015.445>

 **Conflictos de intereses**
Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.



Licencia de Creative Commons

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



Fecha de recibido: 26-02-2023

Fecha de aceptado: 28-07-2023

DOI: 10.22490/21456453.6681

CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA DE LA ZONA DE TRANSICIÓN ACUÁTICO TERRESTRE DE UN HUMEDAL TROPICAL (AYAPEL-COLOMBIA)

PHYSICOCHEMICAL CHARACTERIZATION OF THE AQUATIC-TERRESTRIAL TRANSITION ZONE OF A TROPICAL WETLAND (AYAPEL-COLOMBIA)

Maria Díaz-Mesa,¹ Esnedy Hernández,² Diana M. Agudelo,³ Nora E. Villegas,⁴ Gabriel A. Agudelo,⁵ Sergio E. Herazo,⁶ Lina Berrouet,⁷ Laura M. Lozano,⁸ Natalia Espinosa,⁹ Yarin T. Puerta,¹⁰ Fabio D.J. Vélez,¹¹ Néstor J. Aguirre,¹² Mario A. Quijano-Abril,¹³ José M. Rojas-Villa,¹⁴ Daniela Cardona,¹⁵ Daniela Salazar,¹⁶ Álvaro Wills¹⁷

¹ MSc en Ingeniería Ambiental, Grupo GeoLimna, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Colombia. camila.diaz@udea.edu.co, ² PhD Biología, Grupo GeoLimna, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Colombia. esnedy.hernandez@udea.edu.co, ³ PhD Ingeniería Ambiental, Grupo de Investigación, Ingeniería, Ciencias Ambientales e Innovación, Fundación Universitaria Católica del Norte, Grupo GeoLimna, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Colombia. diana.agudeloe@udea.edu.co, ⁴ MSc en Ingeniería Ambiental, Grupo GAIA, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Colombia. nora.villegas@udea.edu.co, ⁵ MSc en Ingeniería Ambiental, Grupo GAIA, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Colombia. gabriel.agudeloe@udea.edu.co, ⁶ MSc en Ingeniería Ambiental, Grupo Ecología Aplicada, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Colombia. sergio.herazo@udea.edu.co, ⁷ PhD en Ingeniería - Recursos Hidráulicos, Grupo Ecología Aplicada, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Colombia. maria.berrouet@udea.edu.co, ⁸ Ingeniera Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Colombia. lauram.lozano@udea.edu.co, ⁹ Ingeniera Ambiental, Estudiante Maestría en Ingeniería Ambiental, Grupo Ecología Aplicada, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Colombia. natalia.espinosa@udea.edu.co, ¹⁰ MSc Ecosistemas acuáticos, Grupo GeoLimna, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Colombia. yarin.puerta@udea.edu.co, ¹¹ Dr. Phil. (philosophische Fakultät), Grupo GeoLimna, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Colombia. fabio.velez@udea.edu.co, ¹² Dr.rer.nat., Grupo GeoLimna, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Colombia. nestor.aguirre@udea.edu.co, ¹³ PhD Biología, Grupo Estudios Florísticos, Facultad de Ingenierías, Universidad Católica de Oriente, Rionegro, Colombia. maquijano@uco.edu.co, ¹⁴ Agrónomo, Estudiante Maestría en Biología, Grupo Estudios Florísticos, Facultad de Ingenierías, Universidad Católica de Oriente, Rionegro, Colombia. miguel.rojas4@udea.edu.co, ¹⁵ Ingeniera Ambiental, Estudiante Maestría en Ingeniería Ambiental, Grupo Estudios Florísticos, Facultad de Ingenierías, Universidad Católica de Oriente, Rionegro, Colombia. daniela.cardona8959@uco.net.co, ¹⁶ MSc en Restauración Ecológica, Grupo Estudios Florísticos, Facultad de Ingenierías, Universidad Católica de Oriente, Rionegro, Colombia. da.salazar@javeriana.edu.co, ¹⁷ MSc Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Grupo GAIA, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Colombia. alvaro.wills@udea.edu.co

Citación: Díaz-Mesa, M., Hernández, E., Agudelo, D., Villegas, N., Agudelo, G., Herazo, S., Berrouet, L., Lozano, L., Espinosa, N., Puerta, Y., Vélez, F., Aguirre, N., Quijano-Abril, M., Rojas-Villa, J., Cardona, D., Salazar, D. y Wills, A. (2024). Caracterización fisicoquímica de la zona de transición acuático terrestre de un humedal tropical (Ayapel-Colombia). *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 15(2), 181-210. <https://doi.org/10.22490/21456453.6681>

■ RESUMEN

Contextualización: la zona de transición acuático terrestre (ZTAT) en la planicie de inundación (llanura aluvial) Ramsar Ayapel (Colombia), permanece inundada más de la mitad de un año y su franja litoral genera una fuerte influencia en el ecosistema. Una aproximación a la caracterización espacial y temporal de esta zona es fundamental para un posterior análisis funcional, especialmente cuando, a excepción de algunos ecosistemas amazónicos, las planicies de inundación tropical son poco exploradas.

Vacío de conocimiento: la dinámica de las planicies de inundación está regulada principalmente por los pulsos de inundación, que influyen directamente en las condiciones físicas y químicas del agua y el sedimento; por lo anterior, la biota presenta adaptaciones a las condiciones de inundación y anegamiento del ecosistema. Sin embargo, las investigaciones han abordado la fase terrestre y acuática como sistemas separados, haciendo necesario acudir a metodologías que evidencien la conectividad en el sistema y faciliten la interpretación de factores claves en el funcionamiento ecológico en los humedales tropicales.

Propósito: la investigación analizó la estructura y el funcionamiento de la ZTAT a través de variables físicas y químicas en diferentes momentos del pulso de inundación.

Metodología: en dos humedales del complejo cenagoso, sensibles al pulso de inundación, se realizaron tres muestreos: aguas en ascenso (julio de 2021); aguas altas (septiembre de 2021); y aguas en descenso (marzo de 2022). Se monitoreó la ZTAT delimitándola en cuatro subzonas: agua, sedimentos, suelo inundable y suelo.

Resultados y conclusiones: se revelaron cambios significativos en el tiempo asociados al nivel del agua y a las concentraciones de nitrógeno; mientras en el espacio, asistido por el contraste de la ZTAT en los dos sitios, se reflejaron diferencias a través de las variables *in situ* y las características del suelo. Se detectó que la profundidad, transparencia y una mayor concentración de formas de nitrógeno y algunos iones como aluminio y magnesio generaron diferencias a nivel temporal; mientras la conductividad, concentración del calcio y variables asociadas a las características del suelo lo expresaron a nivel espacial gracias a la exploración de la ZTAT; por tanto, la dinámica fisicoquímica de momentos y sitios en un humedal requiere un diseño de muestreo que por medio de la ZTAT facilita la escala de análisis fisicoquímico.

Palabras clave: hidrología, humedal, llanura aluvial, Ramsar.

ABSTRACT ■

Contextualization: The aquatic-terrestrial transition zone (ZTAT) in the floodplain (alluvial plain) Ramsar Ayapel (Colombia) remains flooded for more than half of the year, and its coastal strip generates a strong influence on the ecosystem. An approach to the spatial and temporal characterization of this zone is crucial for further functional analysis, especially when tropical floodplains are little explored except for some Amazonian ecosystems.

Knowledge gap: Floodplain dynamics are mainly regulated by flood pulses, directly influencing the physical and chemical conditions of water and sediment. Therefore, the biota is adapted to the flooding and waterlogging conditions of the ecosystem. However, research has addressed the terrestrial and aquatic phases as separate systems, making it necessary to resort to methodologies that demonstrate connectivity in the system and facilitate the interpretation of key factors in the ecological functioning of tropical wetlands.

Purpose: The research analyzed the structure and functioning of the ZTAT through physical and chemical variables at different times of the flood pulse.

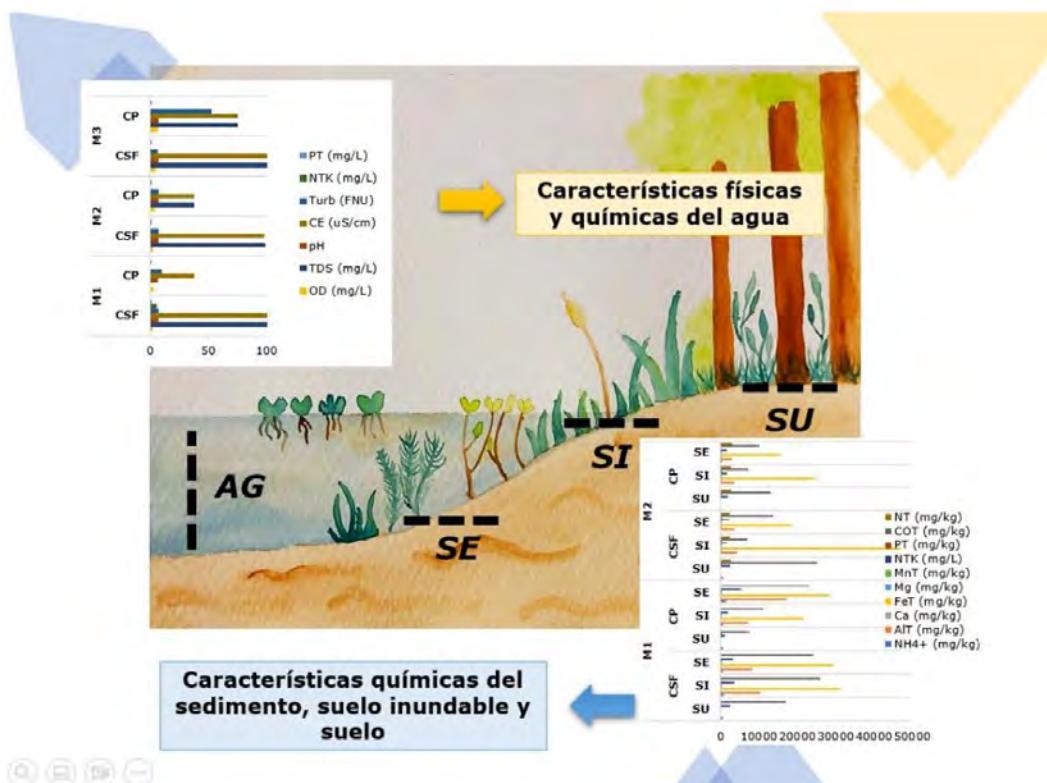
Methodology: In two wetlands of the muddy complex, sensitive to the flood

pulse, three samplings were carried out: rising water (July 2021), high water (September/2021), and declining water (March/2022). The ZTAT was monitored by delimiting it into four subzones: water, sediments, floodable soil, and soil.

Results and conclusions: Significant changes in time associated with water level and nitrogen concentrations were revealed; while in space, assisted by the contrast of the ZTAT at the two sites, differences were reflected through *in situ* variables and soil characteristics. It was detected that depth, transparency, and a higher concentration of nitrogen forms, and some ions such as aluminum and magnesium generated differences on a time level. On the contrary, conductivity, calcium concentration, and variables associated with soil characteristics expressed it at the spatial level due to exploring the ZTAT. Therefore, the physicochemical dynamics of moments and sites in a wetland require a sampling design that, using the ZTAT, facilitates the scale of physicochemical analysis.

Keywords: Hydrology, floodplain, Ramsar, wetland.

■ RESUMEN GRÁFICO



Nota: M1: julio de 2021, aguas en ascenso. M2: septiembre de 2021, aguas altas. M3: marzo de 2022, aguas en descenso. CSF: ciénaga San Francisco, CP: ciénaga Paticos, AG: Agua, SE: sedimento, SI: suelo inundable y SU: suelo.

Fuente: autores.

1 INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas de planicies de inundación conocidos también como humedales de ribera se caracterizan por régimen de flujo variable en intensidad, duración y número de inundaciones (Mitsch *et al.*, 2015). Históricamente los humedales han tenido un importante papel para la huma-

nidad, determinando el hábitat, la cultura y diversas posibilidades de desarrollo a través del suministro de diferentes tipos de recursos (Reid, 2005). Debido a esa relación entre los humedales y la sociedad, y teniendo en consideración que la desaparición de humedales es más rápida que la

experimentada por otros ecosistemas (Darragh *et al.*, 2019; Gardner and Finlayson, 2018; Let and Pal, 2023; Shafi *et al.*, 2023), su análisis y gestión debe generar directrices acertadas para afrontar la degradación, cambios en el uso del suelo, ganadería, minería, extracción de agua, eutrofización, sobreexplotación, introducción de especies exóticas invasoras y cambio ambiental global (Mori *et al.*, 2019).

Colombia es un país con diversos tipos de humedales, su topografía heterogénea y ubicación en el trópico propician condiciones climáticas particulares que generan diferentes ambientes y escenarios dinámicos que representan zonas riparias y terrestres en una contrastante y compleja zonificación (Ricaurte *et al.*, 2019). Evidenciar la conectividad en el sistema y facilitar la interpretación de factores claves en el funcionamiento, es posible desde el estudio de los ecotonos y la transición acuático terrestre se encuentra enmarcada como uno en una planicie de inundación (Dgebuadze and Gladyshev, 2016). Según el concepto moderno, los ecotonos se definen como zonas de tránsito entre sistemas ecológicos adyacentes que tienen un conjunto de características determinadas únicamente por escalas espaciales, temporales y fuerzas de interacción entre estos sistemas adyacentes (Junk *et al.*, 2013).

En las planicies de inundación el ambiente donde la tierra y el agua están co-

nectados por una frontera móvil y regida por el nivel del agua, el ecotono es llamado Zona de Interfaz o Transición Acuático Terrestre (ZITAT o ZTAT). Caracterizarla debe incluir el pulso de inundación, principal fuerza que controla la dinámica y los procesos en la ZIAT (Junk *et al.*, 2020; Kayler *et al.*, 2019).

La ZTAT en el sistema Ramsar Ayapel en Colombia, está constituida por una franja aproximada de 7000 ha, que permanecen inundadas casi ocho meses del año, con profundidades variables entre cero y 3.5 m (Zabala *et al.*, 2019). Durante este periodo, la franja litoral genera una fuerte influencia en el ecosistema, lo que en primera instancia requiere la caracterización espacial y temporal de variables fisicoquímicas considerando la Zona de Transición Acuático Terrestre.

A excepción de algunos ecosistemas amazónicos (Junk *et al.*, 2012, 2020; Kayler *et al.*, 2019; Ricaurte *et al.*, 2019), las evaluaciones de las planicies de inundación tropical no han sido abordadas a través de la caracterización de una ZIAT, objetivo de este trabajo. Este enfoque percibe la conectividad como el flujo genético y energético, ya que transfieren subsidios biogeoquímicos y biológicos que cambian en el tiempo, retos de la visión y gestión de humedales RAMSAR.

2

MATERIALES Y MÉTODOS

Sistema de estudio

La ciénaga de Ayapel (Córdoba-Colombia) (Figura 1B), declarada humedal RAMSAR en el año 2018 (Puerta *et al.* 2016), pertenece a la cuenca del río San Jorge en la región Caribe, al norte de Colombia. El sistema cenagoso de Ayapel cuenta con una extensión aproximada de 1504 km² y con elevaciones entre los 20 y 150 m.s.n.m. De acuerdo con la clasificación de Holdridge, la ciénaga se asocia a una zona de vida de bosque húmedo tropical, con promedio anual de lluvias entre 2000 mm y 2500 mm y temperatura ambiente promedio anual superior a los 25 °C (Zabala *et al.* 2019).

Para la elección de los sitios de muestreo se tuvieron en cuenta criterios como: contrastes entre la geología, geomorfo-

logía y uso del suelo. Se buscaron sitios sensibles al pulso de inundación y que estuvieran incluidos en el polígono Ramsar. Los sitios se establecieron en los cuerpos de agua llamados Paticos (CP) (8° 20' 3.20" N, 75° 8' 3.95" W) a 29 m.s.n.m. y San Francisco (CSF) (8° 17' 0.65" N y 75° 2' 13.37" W) a 33 m.s.n.m., ubicados en los costados occidente y surorientante, respectivamente (Figura 1C). Estos sitios se localizan en una geomorfología de ambiente fluvial, con geoformas originadas a partir de procesos de erosión de las corrientes y acumulación o sedimentación de materiales en las áreas aledañas. Dicha geomorfología se analizó a través de la plancha GmfMM73 provista por el Servicio Geológico Colombiano (SGC) (Figura 1C).

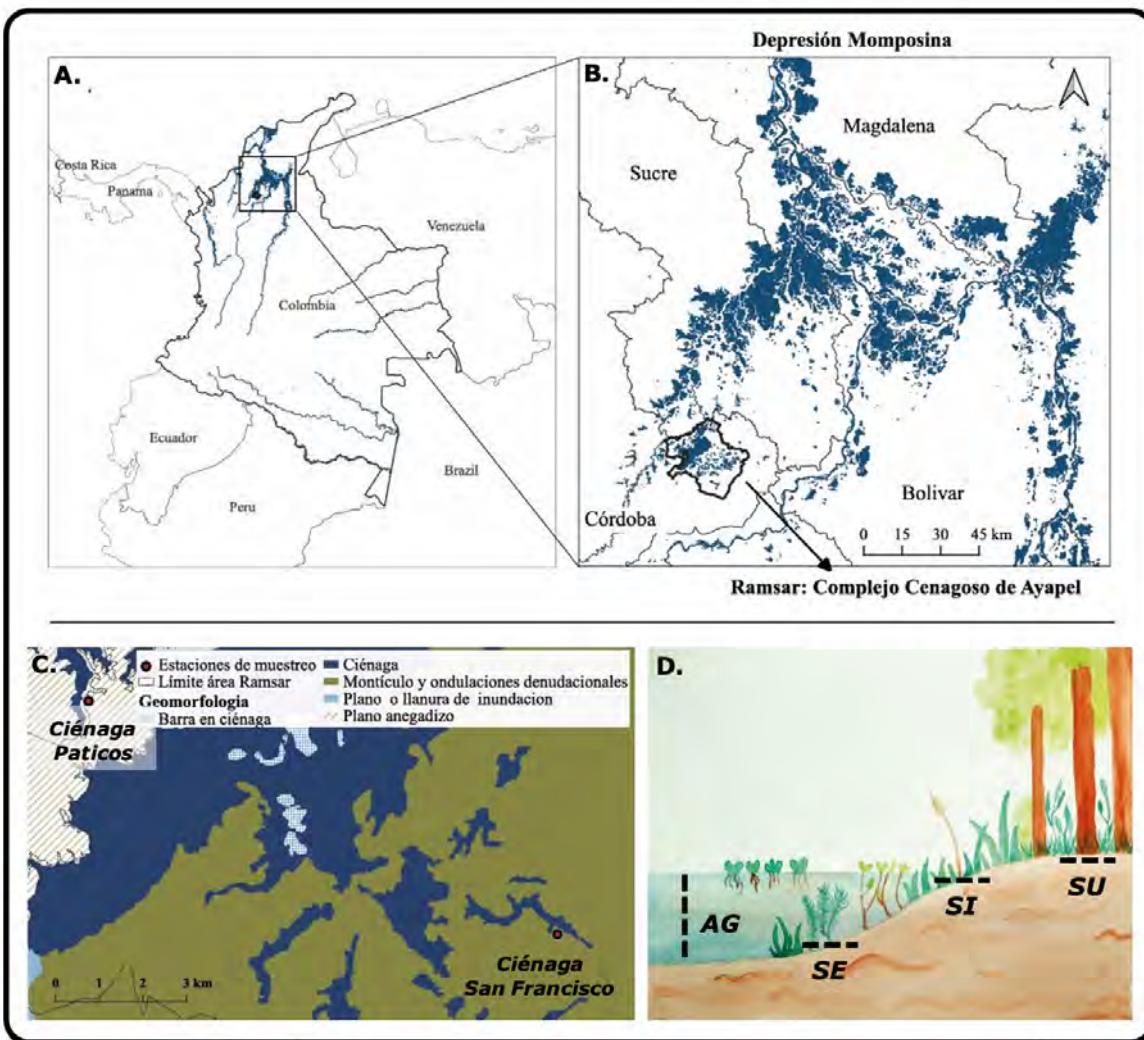


Figura 1. A. Ubicación país Colombia en Sudamérica. B. Ubicación de la zona de estudio (Ciénaga de Ayapel- Córdoba, Colombia), C. Clasificación geológica, geomorfológica y D. zonificación de muestreo considerada en la transición acuático terrestre: AG: Agua, SE: sedimento, SI: suelo inundable y SU: suelo.

Fuente: autores.

Diseño de muestreo

La ZTAT se muestreó en tres momentos (Mtv) del pulso hidrológico: 1: aguas en ascenso (julio de 2021), 2: aguas altas (sep-

tiembre de 2021) y 3: aguas en descenso (marzo de 2022) (Figura 2A). En la Figura 2 se presentan las características hidrológicas de cada una de estas campañas, se observan los niveles de inundación dia-

rios (en cm) medidos por la estación limnigráfica (EL) BEIRUT-AUT [25027760] ($8^{\circ}18'08.0''$ N, $75^{\circ}08'02.0''$ W) asociada al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM de Colombia (Figura 2A). Además, se presenta la precipitación (en mm / mes) para la región

a partir de la base de datos Climate Hazards group InfraRed Precipitation with Stations (CHIRPS) v2.0 (Figura 2C); y se muestran las imágenes satelitales en épocas cercanas a las campañas de muestreo obtenidas a través del programa Sentinel 2 (Figura 2B).

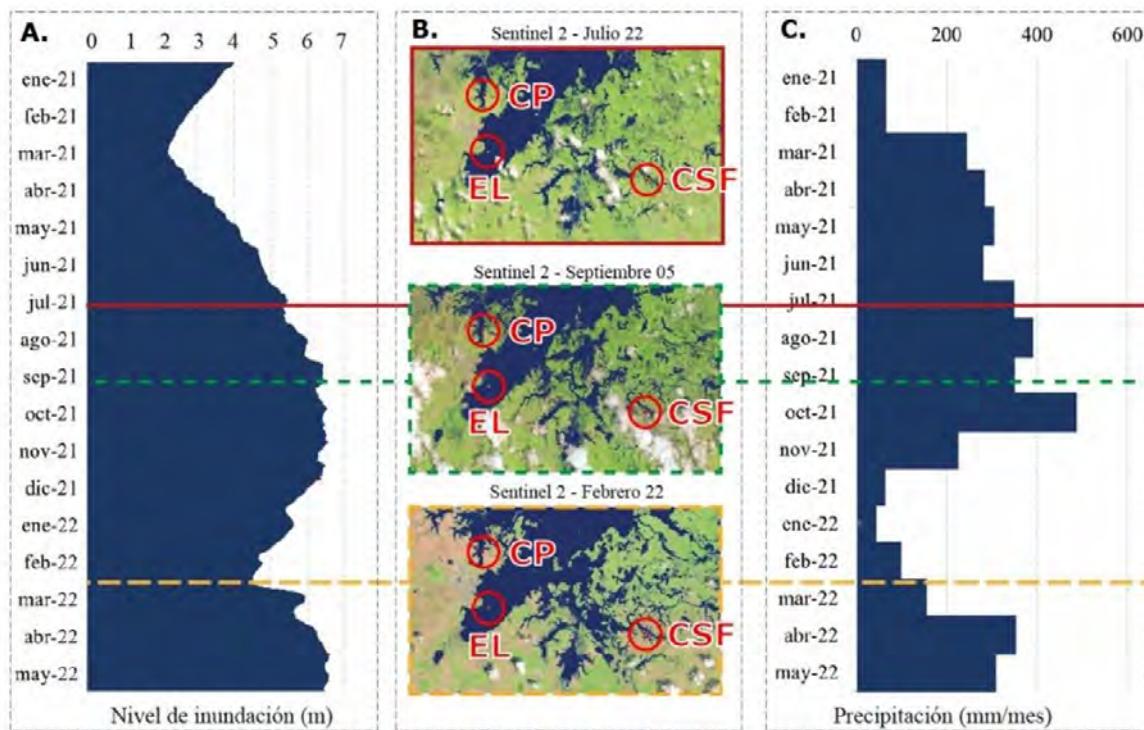


Figura 2. Características hidrológicas en los tres muestreos realizados.

A. Nivel de inundación (m) estación limnigráfica (EL) BEIRUT - AUT [25027760] del IDEAM ($8^{\circ}18'08.0''$ N, $75^{\circ}08'02.0''$ W). **B.** Imágenes satelitales lugares de muestreo. **C.** Datos de precipitación (mm / mes) base de datos Climate Hazards group InfraRed Precipitation with Stations (CHIRPS) v2.0. Imágenes Satelitales Sentinel 2. **Donde:** Línea continua roja: julio de 2021, línea punteado corto verde: septiembre de 2021 y línea punteado largo naranja: marzo de 2022. En las imágenes satelitales: CP: ciénaga Paticos, CSF: ciénaga San Francisco.

Fuente: autores.

El muestreo se realizó en cuatro Zonas de la transición acuático terrestre: agua (AG), sedimentos (SE), suelo inundable (SI) y suelo (SU) (Figura 1D). El análisis del agua incluyó las medidas *in situ* de transparencia y profundidad (con disco Secchi); temperatura (T_{AG}), conductividad eléctrica (CE), sólidos disueltos totales (SDT), oxígeno disuelto (OD), pH (medidas con multiparamétrico HACH HQ40d), y turbidez (Turb) (con un turbidímetro HACH 2100Q). Además, se realizó análisis en laboratorio de las concentraciones de nutrientes como: nitrógeno total (NT), nitrógeno Kjeldahl (NTK), nitrógeno amoniacal (NH_4^+) (cuantificadas por digestión con ácido sulfúrico, destilación y titulación) y fósforo total (PT) (calculado en agua por medio de ácido ascórbico), estas muestras fueron tomadas con botella tipo Kemmerer.

En el sedimento, suelo inundable y el suelo se determinó la concentración de las formas del nitrógeno (NT, NTK y NH_4^+) por digestión con ácido sulfúrico, destilación y titulación, así como el fósforo total (PT) por ignición Andersen. La concentración de carbono orgánico total (COT) se determinó por oxidación sulfocrómica. En el suelo, las concentraciones de los metales como aluminio total (ALT), calcio (Ca), hierro total (FeT), plomo total (PbT), magnesio (Mg) y manganeso total (MnT) fueron determinadas por digestión y método espectrofotométrico; el mercurio total (HgT) fue calculado por el método de extracción por microondas y cuantificación por absorción atómica de vapor

frío en un equipo Buck Scientific 410. Las muestras de sedimento y suelo inundable se tomaron con barreno a profundidad máxima de 20cm y las muestras superficiales de suelo se recogieron con una pala.

Finalmente, los porcentajes de humedad (ω), densidad (ρ), porosidad (φ), gravedad específica (G_s), limo (Limo), arcilla (Arcilla) y arenas finas (Arenas) fueron establecidos por método gravimétrico (Dadey *et al.* 1992). El análisis granulométrico se realizó por método hidrométrico. Estas muestras se tomaron con tubos Shelby de 5 cm de diámetro y 10 cm de altura. Todas las mediciones de agua, sedimento, suelo inundable y suelo se hicieron por duplicado, pero se reportan los promedios. Las unidades de las variables se encuentran en la Tabla 1, Tabla 2, Tabla 3 y Tabla 4.

Análisis estadístico

El tratamiento de la información se fundamentó en el análisis descriptivo de los datos obtenidos en la ZTAT en los dos sitios y tres momentos de muestreo. Lo anterior incluyó estadísticos de tendencia central y dispersión, como valores máximos y mínimos, media aritmética, coeficiente de variación (Tabla 1, Tabla 2, Tabla 3 y Tabla 4) y cajas esquemáticas (Figura 3, Figura 4 y Figura 5), con el objetivo de mostrar la distribución de cada uno de los muestreos y las zonas de la transición acuático terrestre.

Posterior al análisis descriptivo, se llevó a cabo un análisis inferencial para deter-

minar diferencias estadísticamente significativas entre sitios, subzonas de la ZTAT y muestreos por medio de la prueba no paramétrica de análisis de varianza de Kruskall-Wallis (Tabla 1, Tabla 2, Tabla 3 y Tabla 4).

Adicionalmente, se realizaron pruebas de esfericidad de Bartlett y la medida de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO); al respecto, por Bartlett se corroboró la existencia de correlación entre las variables de objeto de estudio (valor $P < 0.05$) y por KMO se detectó que todas las variables arrojaron un valor menor a 0.5. Estos resultados sugieren que los datos no son aptos para la aplicación de un análisis factorial y en su lugar se utilizó un análisis de componentes principales ACP y, por lo tanto, no fue

necesario la eliminación de valores por communalidad.

El análisis de componentes principales (ACP) se realizó para obtener una ordenación de las variables ambientales, el espacio y el tiempo, para ello las variables fueron estandarizadas ($x - \text{min} / \text{máx.} - \text{min}$) y transformadas a su raíz cuadrada ($\sqrt{x+1}$) (Figura 6A).

Para complementar el agrupamiento espacial o temporal que generaron las variables en el ACP, se ejecutaron clúster con el método de conglomeración de Ward y métrica de distancia euclíadiana cuadrada (Figura 6B y 6C). Todos los análisis estadísticos se hicieron con los promedios y se llevaron a cabo en el software R versión 4.1.3.

3

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A través de las variables *in situ* los sitios y momentos de muestreo describen la ZTAT en un humedal tropical, de columna de agua somera (no mayor a 142 cm de profundidad y en promedio 30 °C), con reducida transparencia (promedios entre 38 a 76 cm) (Figura 3A), pero baja tasa de

sólidos disueltos (entre 22 y 124 mg/L) (Figura 3D), concentraciones de oxígeno moderadas a bajas (alrededor de cuatro mg/L) (Figura 3B), pH neutro y conductancia baja (entre 50 y 121 uS/cm) (Figura 3C) (Tabla 1).

■Tabla 1. Promedios del valor mínimo (min), máximo (máx.), media aritmética (\bar{X}) y porcentaje de coeficiente de variación (%CV) de las variables *in situ*

Sitio	ZTAT	Estadigrafo	Transparencia Secchi (cm)	Profundidad Total (cm)	OD (mg/L)	TAG (°C)	SDT (ng/L)	pH (Unidades de pH)	CE (µS/cm)	Turb (FNU)
San Francisco	AG	Min	38.0	70.0	1.6	30.2	98.3	6.8	97.6	6.7
		Max	112.5	171.0	4.5	30.9	150.3	7.0	150.3	7.0
		\bar{X}	73.2	135.3	2.8	30.6	120.2	6.9	120.1	6.8
		%CV	51.1	41.9	55.3	1.3	22.4	1.9	22.7	2.9
	SI	Min	38.3	25.0	1.3	27.4	96.3	4.5	96.6	4.0
		Max	38.3	40.0	4.3	32.0	151.3	7.0	151.4	8.1
		\bar{X}	38.3	32.5	2.7	30.4	123.8	6.3	120.7	5.6
		%CV	0.0	32.6	57.9	6.6	31.4	19.0	23.2	38.4
	SU	Min	-	-	-	18.8	-	6.8	-	-
		Max	-	-	-	31.0	-	7.0	-	-
		\bar{X}	-	-	-	26.3	-	6.9	-	-
		%CV	-	-	-	24.8	-	1.7	-	-
Pálicos	AG	Min	69.0	120.0	2.7	30.0	38.0	6.0	37.7	7.2
		Max	83.0	160.0	6.2	30.6	75.3	7.1	75.4	52.3
		\bar{X}	76.0	141.7	4.2	30.3	56.7	6.7	50.4	23.2
		%CV	13.0	14.3	44.3	1.0	46.6	9.7	42.9	109.1
	SI	Min	-	35.0	1.3	27.9	3.6	5.0	32.5	6.7
		Max	-	40.0	5.7	33.3	41.0	7.0	139.8	98.8
		\bar{X}	-	37.5	3.0	30.6	22.3	6.1	71.4	38.6
		%CV	-	9.4	79.1	7.5	118.8	14.2	83.2	135.4
	SU	Min	-	-	-	31.0	-	5.0	-	-
		Max	-	-	-	37.0	-	7.0	-	-
		\bar{X}	-	-	-	34.0	-	6.0	-	-
		%CV	-	-	-	12.5	-	23.1	-	-
Prueba Kruskal - Wallis (valor P)	Sitio	0.052	0.834	0.522	0.923	0.014*	0.595	0.025*	0.025*	
	Mto	0.043*	0.004*	0.232	0.779	0.322	0.27	0.123	0.245	
	Zona	0.071	1.000	0.337	0.675	0.624	0.071	0.631	0.749	

Nota. %CV resaltados y en negrita corresponden a variaciones mayores al 30%. El valor P corresponde a la prueba kruskal Wallis, valores P < 0.05 (* resaltados) indican diferencias estadísticamente significativas para la variable según el factor analizado: sitios, muestreos o zonas.

Fuente: autores.

En la Figura 3 se observa el aumento de la profundidad del SCA durante el momento de las aguas en ascenso, que coincide no solo con la época de lluvias en la región (Figura 2C), sino también con el rompimiento en la margen derecha del terraplén construido para reducir las inundaciones en La Mojana, ocurridas el 27 de agosto de 2021 (UNGRD, 2021). Este suceso se dio en el sector conocido como Cara de Gato en el municipio de San Jacinto del Cauca, situación que provocó el ingreso del exceso de agua del río Cauca hacia toda la región de La Mojana, por medio de los canales que conforman la red de este delta (Documento CONPES 4076, 2022). Por esta razón, se registraron inundaciones en Ayapel (Córdoba) y otros municipios de Colombia (UNGRD, 2021). Así como ocurrió también a mediados del año 2010 por las fuertes lluvias, asociadas al efecto de “La Niña” 2010-2011 declarada por La NOAA (Hoyos *et al.*, 2013; Rivera-Gómez *et al.*, 2019; Witkowski *et al.*, 2009); mientras que, en las aguas en descenso, aumentó la concen-

tración de los sólidos disueltos asociada a la disminución de la columna de agua, lo que generó también el incremento en la conductividad eléctrica producto de la concentración de los iones disueltos en el agua.

Con respecto a las concentraciones de nutrientes, el nitrógeno y sus formas generaron variaciones (desde valores de cinco hasta 834, 3,377 y 2,851 mg/L-kg, NH_4^+ , NTK y NT, respectivamente) (Figura 4A), estas diferencias se asociaron principalmente al contrastar los valores entre muestras, ya que durante las aguas en ascenso se registraron las mayores concentraciones. La conexión hidrológica lateral en los ecosistemas de llanura de inundación influye en las condiciones locales de los humedales, por ejemplo, diluyendo los nutrientes y las sales disueltas o aportando sedimentos (Dube *et al.*, 2019), como ocurrió con las formas del nitrógeno (Figura 4A), la conductividad eléctrica (Figura 3C) y los sólidos disueltos totales (Figura 3D).

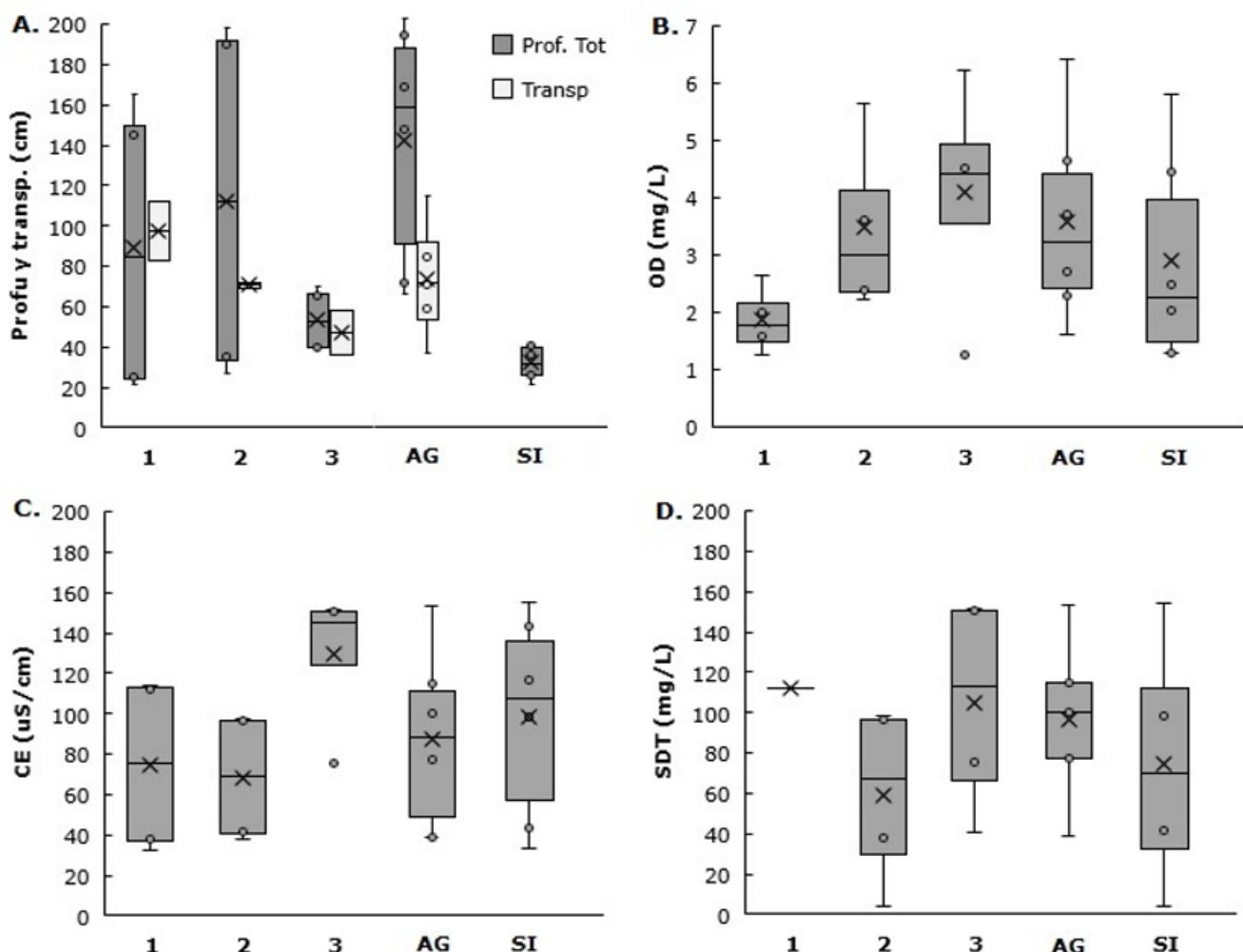


Figura 3. Distribución de las variables *in situ* considerando los momentos de muestreo y las zonas de la Transición Acuático Terrestre. **A.** Profundidad y transparencia. **B.** OD: Oxígeno disuelto. **C.** CE: Conductividad eléctrica. Y **D.** SDT: Sólidos Disueltos Totales.

Fuente: autores.

Con relación al PT se presentó una reducida variación entre el sedimento y el suelo (112 a 167 mg/kg) y concentraciones bajas en el agua (0.03 mg/L) (Tabla 2). De acuerdo con los resultados, el PT y la transparencia Secchi atribuyen al cuerpo de agua un estado mesotrófico (Cun-

ha *et al.* 2013). Tanto para las formas del nitrógeno como del fósforo, las menores concentraciones se presentaron en el agua (Figura 4A y 4B). Con respecto al COT se detectaron variaciones considerables en su concentración (9,130 a 21,023 mg/kg) (Tabla 2), las mayores concentraciones se

encontraron durante la fase de aguas en ascenso y una disminución en la etapa de aguas altas, que corresponde con lo reportado para la ciénaga por Rúa *et al.* (2013).

Además, es similar al comportamiento de la llanura de inundación “Várzea do Lago Grande de Curuai” del río Amazonas (Moreira-Turcq *et al.*, 2013).

■Tabla 2. Promedios del valor mínimo (min), máximo (máx.), media aritmética (\bar{X}) y porcentaje de coeficiente de variación (%CV) del contenido de nutrientes

Site	ZTAT	Estadígrafo	NTK (mg/L)				COT (mg/kg)
			NH_4^+ (mg/kg (AG))	NT (mg/kg (SE, SI y SU))	PT (mg/kg (AG))		
San Francisco	AG	Min	4.0	4.0	4.0	0.0	-
		Max	4.0	5.3	5.0	0.0	-
		\bar{X}	4.0	4.6	4.5	0.0	-
		%CV	-	19.7	15.7	12.3	-
	SE	Min	361.0	2,054.3	2,547.8	112.0	13,748.5
		Max	696.3	3,326.3	2,547.8	222.4	24,053.1
		\bar{X}	528.6	2,690.3	2,547.8	167.2	18,900.8
		%CV	44.8	33.4	0	46.7	38.6
	SI	Min	361.0	1,569.3	2,440.1	112.0	6,964.6
		Max	762.0	3,453.6	2,440.1	158.2	26,037.8
		\bar{X}	561.5	2,511.4	2,440.1	135.1	16,501.2
		%CV	50.5	53.1	0.0	24.2	81.7
	SU	Min	436.9	2,288.7	2,756.0	0.0	16,892.7
		Max	602.3	2,489.3	2,756.0	282.9	25,153.3
		\bar{X}	519.6	2,389.0	2,756.0	141.4	21,023.0
		%CV	22.5	5.9	0.0	141.4	27.8

Sitio	ZTAT	Estadígrafo	NH ₄ ⁺ (mg/L (AG) mg/kg (SE, SI y SU))	NTK (mg/L)	NT (mg/L (AG) mg/kg (SE, SI y SU))	PT (mg/L (AG) mg/kg (SE, SI y SU))	COT (mg/kg)	
Pálicos	AG	Min	4.0	4.0	4.0	0.0	-	
		Max	5.0	4.0	5.2	0.1	-	
		X̄	4.5	4.0	4.6	0.0	-	
		%CV	15.7	0.0	18.8	28.5	-	
	SE	Min	370.8	1,545.2	2,851.2	112.0	10,127.7	
		Max	1,297.4	5,208.2	2,851.2	112.0	23,066.0	
		X̄	834.1	3,376.7	2,851.2	112.0	16,596.9	
		%CV	78.6	76.7	0.0	0.0	55.1	
	SI	Min	361.0	1,606.2	2,600.7	112.0	7,155.7	
		Max	552.1	1,834.7	2,600.7	122.3	11,051.0	
		X̄	456.6	1,720.5	2,600.7	117.2	9,103.3	
		%CV	29.6	9.4	0.0	6.2	30.3	
	SU	Min	361.0	1,224.0	2,653.8	142.8	7,384.0	
		Max	530.2	1,774.8	2,653.8	172.5	12,963.9	
		X̄	445.6	1,499.4	2,653.8	157.7	10,173.9	
		%CV	26.8	26.0	0.0	13.3	38.8	
Prueba Kruskal - Wallis (valor P)		Sitio	0.599	0.452	0.530	0.755	0.109	
		Mto	0.014*	0.066	0.036*	0.087	0.200	
		Zona	0.068	0.065	0.061	0.044*	0.584	

Nota. %CV resaltados y en negrita corresponden a variaciones mayores al 30%. El valor P corresponde a la prueba kruskal Wallis, valores P < 0.05 (* resaltados) indican diferencias estadísticamente significativas para la variable según el factor analizado: sitios, muestreos o zonas.

Fuente: autores.

Los cambios en el COT pueden estar asociados a un mayor proceso metabólico del sistema (Borges *et al.*, 2019), favorecido por la transición de aguas en el pulso de inundación, ya que durante aguas altas suele ser menor la concentración de COT (Figura 4C) (Ordóñez *et al.* 2014). Esto porque durante las aguas en ascenso la ve-

getación acuática presenta floraciones y fructificaciones, es decir que se encuentran en gran actividad metabólica, y cuando la columna de agua llega a su nivel máximo la cobertura de vegetación acuática disminuye, lo anterior debido a la carencia en la plasticidad morfológica de algunas especies de vegetación acuática, dificultándo-

les soportar los cambios del nivel de agua (Casanova and Brock, 2000; Rodriguez and Barrera, 2006). De esta manera se ocasiona su marchitez quedando retenidas en las orillas de los cuerpos de agua, promoviendo los procesos de descomposición y disminución del COT; adicionalmente, la

descomposición de los macrófitos acuáticos es un ejemplo importante de cómo la actividad microbiana contribuye a la composición iónica (Brito *et al.*, 2014) y aumentando la CE, como ocurrió en marzo de 2022 (Figura 3C).

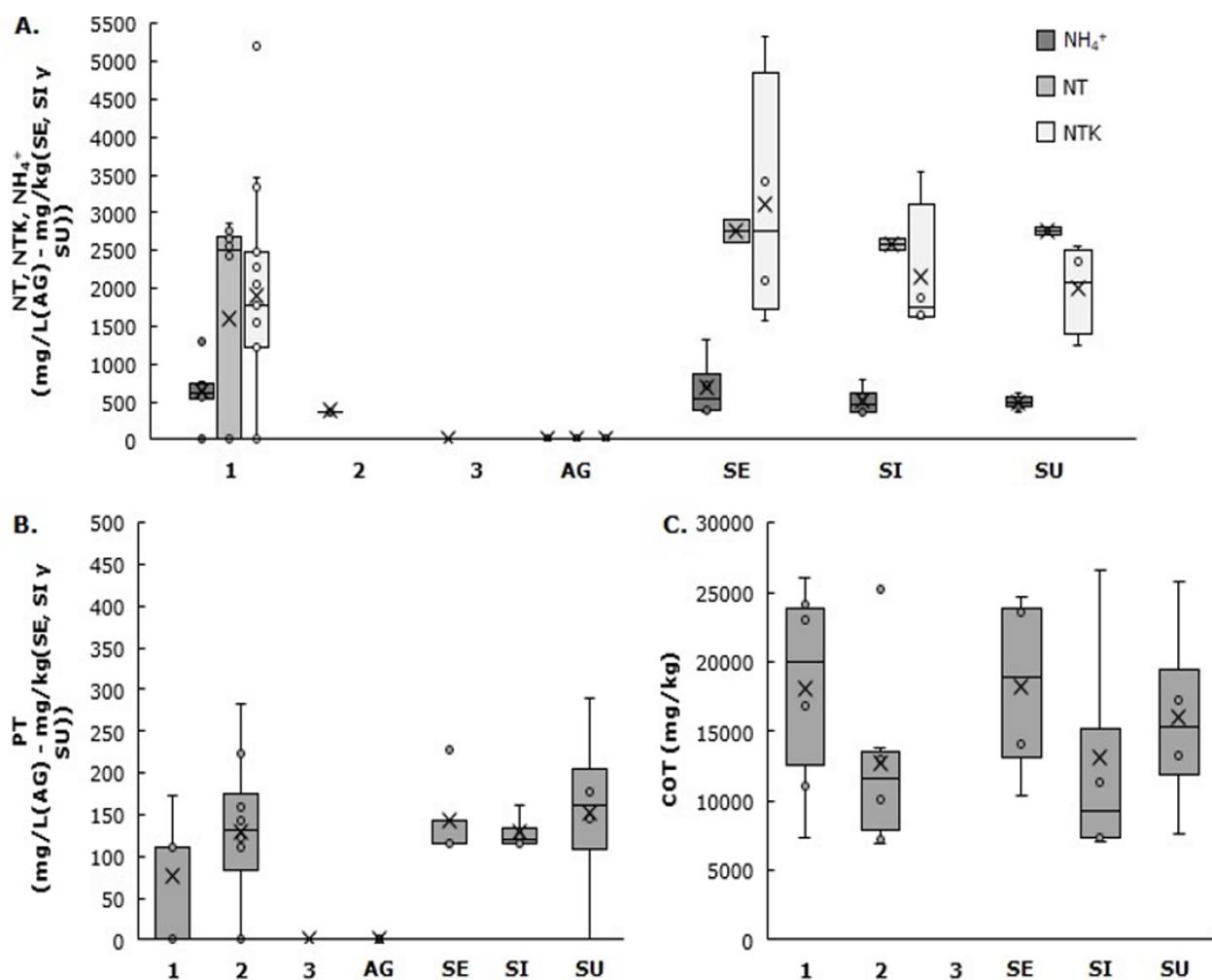


Figura 4. Distribución del contenido de nutrientes considerando los momentos de muestreo y las zonas de la Transición Acuático Terrestre. **A.** NT: Nitrógeno total, NTK: Nitrógeno total Kjeldahl, NH_4^+ : Nitrógeno amoniacal. **B.** PT: Fósforo Total. Y **C.** COT: Carbono Orgánico Total.

Fuente: autores.

En cuanto a la concentración de los metales analizados, se registraron tendencias similares en el espacio y el tiempo; el aluminio total osciló entre 5,425 y 10,142 mg/kg; el calcio entre 13 y 66 mg/kg; el hierro total entre 22,087 y 39,062 mg/kg; el magnesio y manganeso total entre

47 y 171 mg/kg y entre 33 y 191 mg/kg respectivamente. Las concentraciones de mercurio y plomo totales fueron bajas y sin variación en los ambientes y zonas de estudio para el caso 140 y 10 mg/kg, respectivamente (Tabla 3).

■ Tabla 3. Promedios del valor mínimo (min), máximo (máx.), media aritmética (\bar{X}) y porcentaje de coeficiente de variación (%CV) de la concentración de metales en el sedimento y suelo inundable

Sitio	ZTAT	Estadígrafo	AlT (mg/kg)	Ca (mg/kg)	FeT (mg/kg)	Mg (mg/kg)	MnT (mg/kg)	HgT (mg/kg)	PbT (mg/kg)
San Francisco	SE	Min	3,436.5	29.1	18,669.7	73.4	79.5	140.0	10.0
		Max	8,253.9	44.5	29,463.1	117.7	116	140.0	10.0
		\bar{X}	5,845.2	36.8	24,066.4	95.6	97.7	140.0	10.0
		%CV	58.3	29.6	31.7	32.8	26.4	0.0	0.0
	SI	Min	4,282.7	56.5	31,296.0	36.1	146.3	140.0	10.0
		Max	10,274.3	74.9	46,827.6	306.4	235.1	140.0	10.0
		\bar{X}	7,278.5	65.7	39,061.8	171.2	190.7	140.0	10.0
		%CV	58.2	19.8	28.1	111.6	32.9	0.0	0.0
Paticos	SE	Min	3,066.1	10.4	15,682.2	31.3	31.5	140.0	10.0
		Max	17,217.4	37.2	28,491.3	146.8	74.0	140.0	10.0
		\bar{X}	10,141.8	23.8	22,086.7	89.0	52.7	140.0	10.0
		%CV	98.7	79.8	41.0	91.8	57.1	0.0	0.0
	SI	Min	3,559.8	10.0	21,763.7	29.9	29.9	140.0	10.0
		Max	7,290.0	16.5	24,716.1	64.9	36.8	140.0	10.0
		\bar{X}	5,424.9	13.2	23,239.9	47.4	33.3	140.0	10.0
		%CV	48.6	34.5	9.0	52.2	14.6	0.0	0.0
Prueba Kruskal - Wallis (valor P)	Sitio	0.773	0.043*	0.149	0.248	0.021*	-	-	
	Mto	0.021*	0.564	0.386	0.043*	1.000	-	-	
	Zona	0.773	0.773	0.248	0.564	0.773	-	-	

Nota. %CV resaltados y en negrita corresponden a variaciones mayores al 30%. El valor P corresponde a la prueba kruskal Wallis, valores P < 0.05 (* resaltados) indican diferencias estadísticamente significativas para la variable según el factor analizado: sitios, muestreos o zonas.

Fuente: autores.

El grupo de variables asociadas a los sedimentos y el suelo no reflejaron diferencias en las tendencias espaciales y temporales, su patrón representa unos ambientes de baja gravedad y densidad (promedios de 2%), humedades y porosi-

dades moderadas a altas (62-91 % y 47-68 %, respectivamente), con mayor porcentaje de arenas finas (45-59 %) con respecto a las proporciones de limos y arcillas (13 - 36 %) (Tabla 4 y Figura 5).

■Tabla 4. Promedios del valor mínimo (min), máximo (máx.), media aritmética (\bar{X}) y porcentaje de coeficiente de variación (%CV) de las características físicas del sedimento, suelo inundable y suelo

Sitio	ZTAT	Estadígrafo	θ (%)	P (%)	ϕ (%)	Gs (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Arenas Finas (%)
San Francisco	SE	Min	62.7	0.9	44.3	2.3	9.1	20.0	41.6
		Max	90.6	1.6	75.0	2.4	38.5	27.4	63.5
		\bar{X}	81.0	1.3	58.9	2.4	21.3	24.1	54.6
		%CV	19.5	28.7	26.2	0.7	71.7	15.8	21.1
	SI	Min	43.8	0.9	34.5	2.2	13.2	11.3	30.5
		Max	98.7	2.0	70.3	2.5	58.2	27.0	59.8
		\bar{X}	69.3	1.6	50.2	2.4	35.7	19.0	45.3
		%CV	39.9	37.8	36.4	6.1	63.0	41.2	32.3
	SU	Min	36.8	0.8	62.2	2.2	19.5	13.2	38.5
		Max	87.1	1.3	74.9	2.3	48.2	24.2	59.1
		\bar{X}	65.2	1.1	67.9	2.3	29.5	19.1	51.3
		%CV	39.5	25.9	9.5	1.3	54.9	28.9	21.8
Páticos	SE	Min	87.7	1.6	39.2	2.1	4.2	25.4	48.4
		Max	96.0	1.9	53.8	2.5	26.2	30.4	65.4
		\bar{X}	91.4	1.7	46.9	2.3	13.1	28.0	58.9
		%CV	4.6	10.6	15.6	7.3	88.8	8.9	15.6
	SI	Min	75.0	1.4	39.6	2.3	18.0	16.5	44.7
		Max	88.5	1.8	53.5	2.5	33.0	26.0	56.0
		\bar{X}	82.1	1.6	48.6	2.4	26.3	21.6	52.1
		%CV	8.2	12.8	16.2	5.2	29.0	22.3	12.3
	SU	Min	47.8	1.0	63.4	2.0	17.9	16.7	37.6
		Max	74.1	1.2	63.4	2.5	45.7	18.9	63.6
		\bar{X}	62.4	1.1	63.4	2.3	32.7	18.0	49.3
		%CV	21.4	12.4	0.1	10.0	42.7	6.4	26.8

Sitio	ZTAT	Estadígrafo	ω (%)	ρ (%)	φ (%)	G_s (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Arenas Finas (%)
Prueba Kruskal - Wallis (valor P)	Sitio		0.566	0.354	0.310	0.930	0.508	0.627	0.627
	Mto		0.203	0.229	0.203	0.475	0.927	0.296	0.960
	Zona		0.067	0.049*	0.057	0.420	0.143	0.034*	0.296

Nota. %CV resaltados y en negrita corresponden a variaciones mayores al 30%. El valor P corresponde a la prueba kruskal Wallis, valores P < 0.05 (* resaltados) indican diferencias estadísticamente significativas para la variable según el factor analizado: sitios, muestreos o zonas.

Fuente: autores.

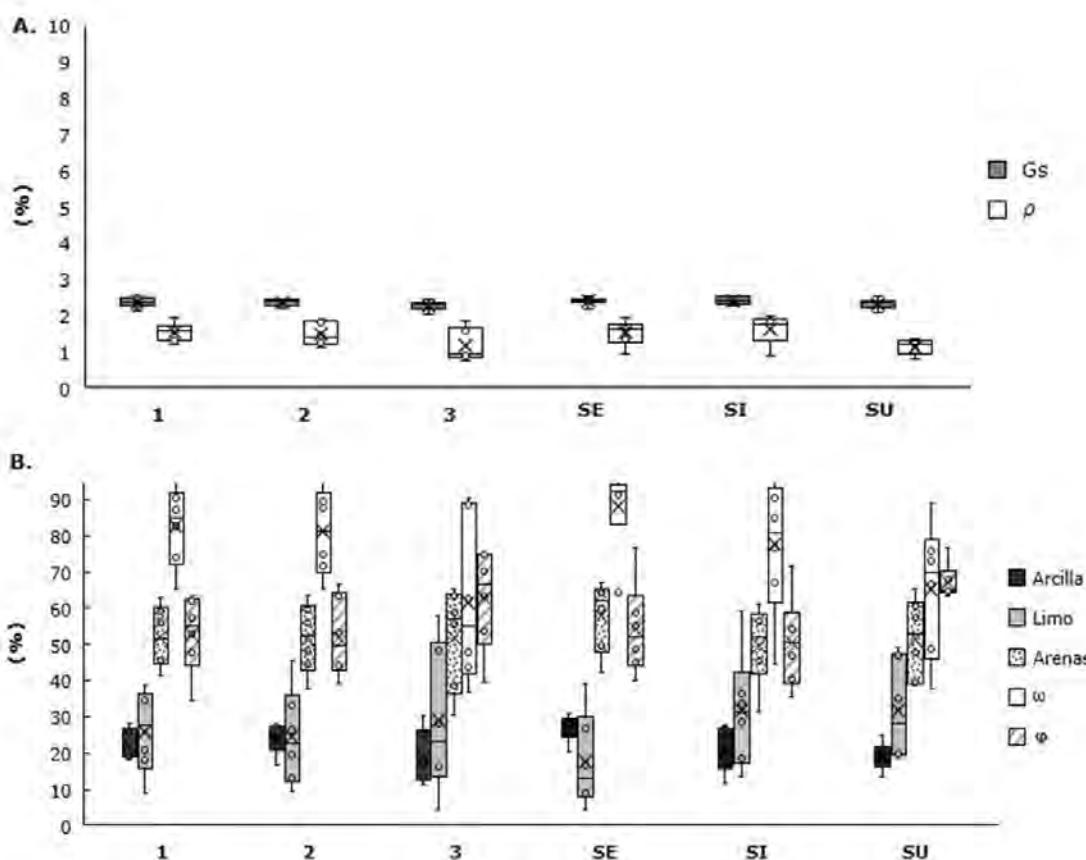


Figura 5. Distribución de las características físicas del sedimento, suelo inundable y suelo, considerando los momentos de muestreo y las zonas de la Transición Acuático Terrestre. A. G_s : gravedad específica y ρ : densidad. B. ω : humedad, φ : porosidad, Arcilla: porcentaje de arcillas, Limo: porcentaje de limos y Arenas: porcentaje arenas finas.

Fuente: autores.

Al considerar el análisis de medianas Kruskal-Wallis por cada factor (sitio, muestreo y zona de transición acuático terrestre), se detectaron diferencias significativas (valores $P < 0.05$) del calcio entre ciénagas, aunque el rango de esta variable no implica realmente diferencias ecológicas importantes. Además de diferencias en los sólidos disueltos totales ($P=0.014$), la conductividad eléctrica ($P=0.025$) y la turbiedad ($P=0.025$), probablemente asociadas a que la ciénaga Paticos, se caracteriza por tener descargas de aguas residuales domésticas provenientes del casco urbano (Chalarca *et al.*, 2007). Los resultados difieren de lo reportado por Borges *et al.* (2013), que encontraron en la cuenca del río Solimões, en la Amazonía Brasileña, como principal factor diferenciador el pH en lo que se refiere a la influencia de las aguas residuales; mientras la conductividad eléctrica y la transparencia del agua están determinadas por los diferentes momentos del ciclo hidrológico, siendo esta última también estadísticamente significativa para el sistema cenagoso de Ayapel (SCA) ($P=0.043$) (Tabla 1).

Con respecto a los tres muestreos se registraron diferencias en las concentraciones de nitrógeno amoniacal, el nitrógeno total Kjeldahl y el nitrógeno total, debido al registro de mayores concentraciones durante el primer muestreo correspondiente a aguas en ascenso (julio de 2021).

Adicionalmente, las concentraciones de aluminio total y magnesio también registraron diferencias temporales, pero los rangos de estas variaciones no implican

diferencias ambientales relevantes (5,425-10,142 mg/kg y 47-171 mg/kg) debido a que constituye el 8.1 % de la corteza terrestre, lo cual lo convierte en el segundo metal más abundante, proviniendo principalmente de fuentes naturales, al ser uno de los principales constituyentes de los silicatos que componen las arcillas minerales (Pérez *et al.*, 2015).

En cuanto al Mg, el 70 % de este metal alcalino está asociado a la fracción fina, lo que sugiere una constitución de minerales arcillosos que contienen Na y Mg en su estructura octaédrica y, en consecuencia, principalmente natural (Vital and Stattegger, 2000). Finalmente, entre las zonas de análisis de la transición acuático terrestre el porcentaje de la densidad y las arcillas registró una proporción relativamente mayor en la zona de los sedimentos y suelo inundable; sin embargo, estas diferencias significativas no están asociadas a una real diferenciación ambiental entre los compartimentos.

El análisis de componentes principales realizado con las variables físicas y químicas, en función de las ZTAT en cada sitio y muestreos (Figura 6A), indicó la selección de aquellos componentes que presentaran valores propios mayores a 1. Según el criterio de la raíz latente, la explicación de la varianza total de los dos primeros componentes correspondió al 71.1% ($CP1=59.6\%$ y $CP2=11.5\%$). Cada componente estuvo representado en la Ecuación 1 y la Ecuación 2, por el conjunto de variables con criterio mayor a 0.4.

$$PC1 = 0.7583OD - 0.6779T_{AG} - 0.7147SDT - 0.7765pH - 0.7976CE - 0.5888Turb + 0.8118NH_4^+ + 0.6316FeT + 0.8225NTK + 0.7679PT + 0.6952COT + 0.4846NT + 0.700\omega + 0.9411\varphi + 0.6834\varphi + 0.8958Gravas + 0.7091Limos + 0.9302Arcillas + 0.8866Arenas$$

(Ecuación 1)

$$PC2 = 0.5995ALT + 0.6468Ca + 0.6258Mg + 0.6032MnT$$

(Ecuación 2)

Al observar la ordenación de la Figura 6A, fue notable que el grupo de variables compuesto por los SDT, la CE, el OD, la turbidez, la T_{AG} y el pH se asocia con las zonas de transición del agua y el suelo inundable de ambos sitios (San Francisco y Paticos); a su vez, este grupo se ubica en forma contraria a la representación de los vectores de los metales, los nutrientes y las variables asociadas a las características del suelo, asociados con las zonas de transición del sedimento y el suelo en ambas estaciones. Esto significa que la ZTAT responde a bajas concentraciones de metales y nutrientes, por lo que es de esperar que el suelo y los sedimentos actúan como reservorio de estas sustancias, que eventualmente estarán disponibles en el agua si las condiciones como pH y oxígeno cambian en el sistema.

Aunque en el análisis de componentes principales los sitios (Paticos y San Fran-

cisco) no tienen una tendencia o clara separación con respecto a las variables analizadas, sí se puede visualizar una diferenciación en las subzonas de la ZTAT durante el tercer muestreo (aguas en descenso); particularmente, su ubicación en el espacio bidimensional correspondió a los valores medios de los vectores que representan las variables (Figura 6A). Con base en la información anterior, se llevó a cabo un análisis de clasificación tipo clúster, teniendo en consideración las variables *in situ* como el pH, la temperatura, la turbidez, el oxígeno disuelto, la conductividad eléctrica y los sólidos disueltos totales (Figura 6B). La clasificación demostró una separación clara de las estaciones San Francisco y Paticos, generando una relativa segregación de las zonas de sedimento, suelo inundable y suelo (Figura 6C). Los agrupamientos no evidenciaron separaciones asociadas a los muestreos (Figura 6B y 6C).

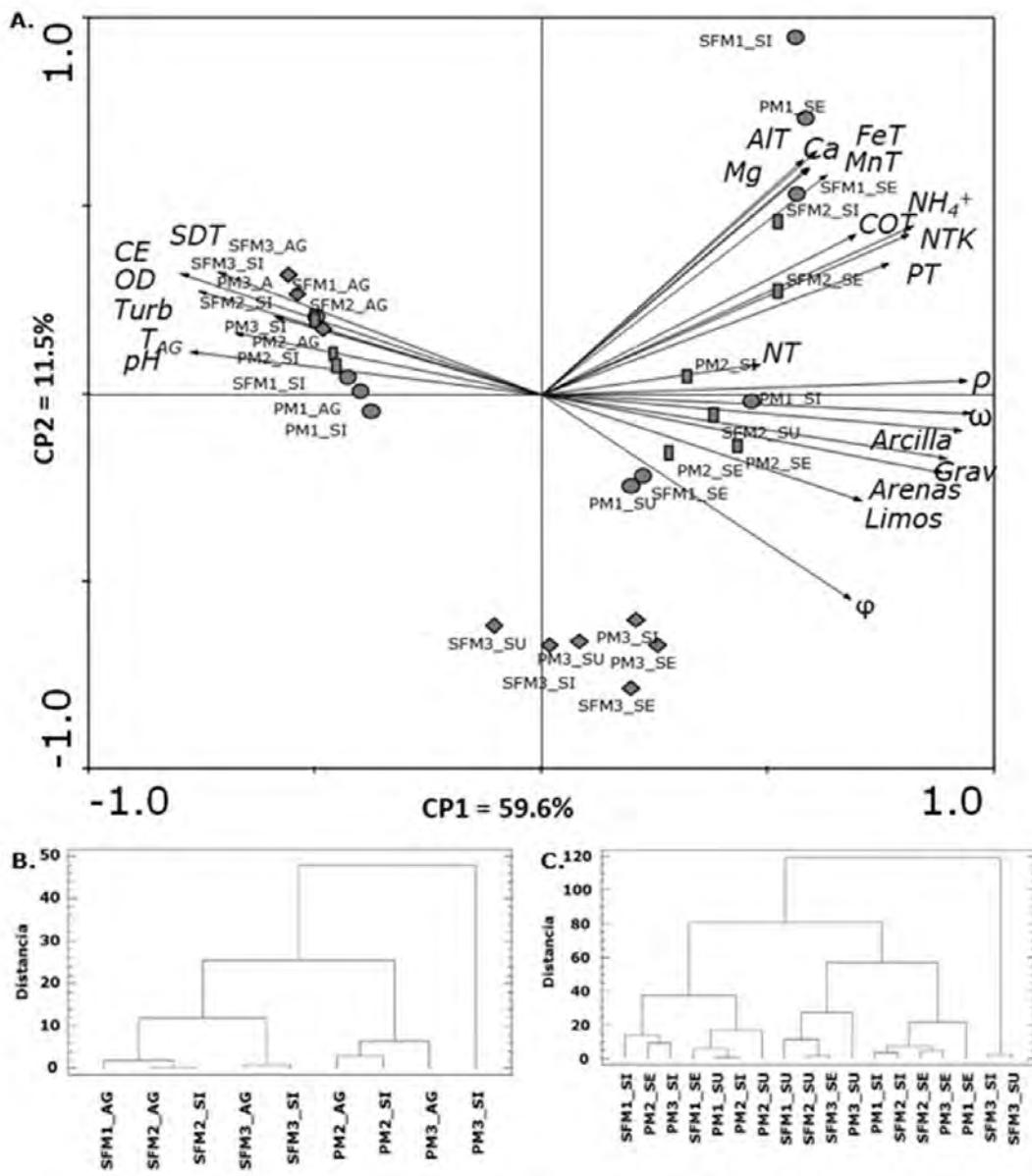


Figura. 6. A. Análisis de componentes principales de las variables ambientales, estaciones, muestreos y zonas de transición acuático terrestre. B. Análisis de agrupamiento usando variables in situ y C. características del suelo. **Donde:** **Sitios** (SF: San Francisco, P: Paticos), **muestreos** (1: julio / 2021, 2: septiembre / 2022, 3: marzo / 2022), Zona en la transición acuático terrestre (**AG**: Agua, **SE**: sedimento, **SI**: Suelo inundable y **SU**: Suelo).

Fuente: autores.

Las propiedades fisicoquímicas que caracterizan las planicies de inundación impulsan adaptaciones a nivel funcional y comprenden un monitoreo complejo poco abordado en sistemas tropicales, siendo la Amazonía brasileña un sistema de referencia del estudio de este ecotono (Junk *et al.*, 2013, 2020; Kayler *et al.*, 2019). El abordaje de la ZTAT en este trabajo se realizó en dos estaciones y tres momentos de muestreo a través del análisis en la columna del agua, el sedimento, el suelo inundable y el suelo; compartimentos influenciados por la magnitud, frecuencia y duración de la inundación. Gracias a este diseño y a las variables ambientales fue posible detectar particularidades de este complejo ecotono.

La evaluación espacial y temporal representó variaciones por medio de diferentes grupos de parámetros, en primer lugar, la mayor diferencia temporal estuvo principalmente generada por la profundidad y la transparencia, además de una mayor concentración de formas de nitrógeno y algunos iones como aluminio y magnesio, durante el muestreo de aguas en ascenso (julio de 2021). También, el ordenamiento reveló que el muestreo en aguas en descenso (marzo de 2022) se separó en una posición intermedia entre los valores extremos de variables *in situ*, concentración de nutrientes y porcentajes de material en el suelo, lo que demuestra que la desviación estándar entre los datos se movilizó entre los muestreos de transición o ascenso a aguas altas y aguas altas.

Al respecto, un ciclo del pulso de inundación temporal envuelve procesos de secado, humedecimiento e inundación, expansión, homogenización e incremento de la conectividad espacial, lo que activa un conjunto de procesos en el ecosistema como cambios térmicos e hidrodinámicos, entrada de sustancias transportadas por el flujo (disueltas o suspendidas, orgánicas e inorgánicas) e inundación de hábitats terrestres en la franja periférica, movilizando materiales orgánicos e inorgánicos depositados durante la fase terrestre por el agua sobrenadante (Junk and Wantzen, 2004), lineamientos que concuerdan con la identificación de señales temporales registradas por medio de este estudio.

Al analizar la condición espacial, la conductividad eléctrica y la concentración del calcio, se registraron diferencias leves, pero un análisis de agrupamiento usando las variables *in situ* separó las estaciones Paticos y San Francisco por medio de las cuantificaciones en columna de agua y suelo inundable. Las variables asociadas a las características del suelo también segregaron parcialmente las dos estaciones, tendiendo además a separar al interior de ellas las zonas ubicadas en el sedimento y suelo inundable con respecto a las ubicadas en el suelo. Este resultado demuestra que la ZTAT revela aspectos potencialmente diferenciables entre diferentes sitios o regiones del humedal y su aptitud ecológica, pero se concluye que únicamente era posible detectarlo gracias al contraste espacial, incluyendo no sólo diferentes estaciones de muestreo, sino

también el análisis de la ZTAT a través de variables ambientales.

Es importante mencionar que ambas estaciones de muestreo presentan la incidencia de un relativo aislamiento, lo cual ha significado una menor exposición de estos cuerpos de agua a las descargas asociadas a actividad minera reportadas en la zona (Zabala *et al.*, 2019), asunto corroborado en este estudio por concentraciones de mercurio o plomo que no se asocian a valores de riesgo (Junk *et al.*, 2020). Lo anterior, probablemente generó un grado de similitud expuesto por las variables *in situ*, las concentraciones de nutrientes, metales y los porcentajes de la estructura del suelo; probablemente acorde al uso del suelo influente, existieron diferencias en el nitrógeno, el fósforo, el carbono orgánico total y el porcentaje de arcillas, visualizadas gracias al contraste adicional entre los momentos de inundación y/o las zonas de transición analizadas. Dichos resultados evidencian y corroboran que estas variables podrían ser consideradas indicadores del uso del suelo en la gestión de los humedales tropicales, ya que reflejan procesos que combinan la deposición y el lavado de materiales, escenarios que requieren diseño de adaptaciones ante un uso del suelo expansivo.

Adicionalmente, se considera que una longitud limitada del *fetch* efectivo y en

consecuencia, un menor trabajo mecánico de resuspensión por acción del viento y el oleaje (Montoya y Aguirre, 2013), permite asumir que ambos sitios se encuentran aislados y sus ZTAT representan su identidad local, aspecto relevante en el diseño del estudio de un humedal a través de su ZTAT para establecer si los sitios son en realidad contrastantes, tal como se verificó para la selección de los sitios de muestreo de este trabajo (Paticos y San Francisco).

La transición de fase terrestre a fase acuática representa un conjunto de válvulas de alternancia entre entradas y salidas de energía, nutrientes y materiales, representando un eje ecológico que depende de la variabilidad natural hidrológica, por lo que los humedales son funcionalmente ecosistemas indicadores y altamente vulnerables (Xiang *et al.*, 2016). Por esta razón, abordar el análisis de los procesos que vinculan los sistemas terrestres y acuáticos es crucial para el diseño y establecimiento de lineamientos para la gestión de los humedales (Dgebuadze and Gladyshev, 2016; Junk *et al.*, 2020; Ricaurte *et al.*, 2017). De esta manera, el presente trabajo expuso particularidades ambientales detectadas a través del diseño espacial y temporal, aspectos relevantes en la condición local o identidad de cada humedal.

CONCLUSIONES 4

En síntesis, evaluar la ZTAT a través del factor temporal expuso cambios a través del nivel del agua, la transparencia Secchi y concentraciones de nitrógeno, mientras el espacio asistido por el contraste de la ZTAT en los dos sitios reflejó diferenciaciones a través de las variables *in situ* sólidos disueltos totales, conductividad eléctrica y turbiedad. Al respecto, es claro que la principal fuerza que controla la dinámica y los procesos en la ZTAT es el pulso de inundación, períodos de anegamiento, sedimentación, ancho de la ZTAT y el tiempo de sequía o fase terrestre (Junk *et al.*, 2012); teniendo influencia sobre la productividad primaria, la germinación o marchitez de la vegetación acuática (Casanova and Brock, 2000; Rodríguez y Barrera, 2006), las entradas

o salidas de materia orgánica, iones, nutrientes (Dube *et al.*, 2019; Moreira-Turcq *et al.*, 2013), metales pesados (Rúa *et al.*, 2013). pero el predominio de los aportes alóctonos en humedales provenientes de la época de lluvias. En contraste, la intensificación de procesos de colmatación y dinámica endógenos en la época de sequía sólo pueden ser visualizados a través del estudio de diferentes compartimentos de la ZTAT (Earl *et al.*, 2014; Neiff, 2001). Es así como las variables mencionadas podrían ser consideradas en el análisis de una ZTAT, pero es necesario que el diseño incluya puntos contrastantes y diferentes momentos hidrológicos, lo que potenciará el diseño y la detección fisicoquímica asociada a la compleja escala de los procesos en los humedales.

CONTRIBUCIÓN DE LA AUTORÍA ■

Maria Díaz-Mesa: conceptualización, metodología, análisis de datos, investigación, escritura, borrador original, administradora del proyecto. **Esnedy Hernández:** conceptualización, metodología, análisis de datos, investigación, logística, escritura, borrador original, supervisión, adquisición de recursos. **Diana M. Agudelo:** conceptualización, meto-

dología, análisis de datos, investigación, escritura, borrador original, supervisión. **Nora E. Villegas:** conceptualización, revisión y edición. **Gabriel A. Agudelo:** investigación, escritura, borrador original. **Sergio E. Herazo:** investigación, escritura, borrador original. **Lina Berrouet:** conceptualización, revisión y edición. **Laura M. Lozano:** investigación, revisión y edición.



Natalia Espinosa: investigación, revisión y edición. **Yarin T. Puerta:** investigación, revisión y edición. **Fabio D.J. Vélez:** conceptualización, logística, revisión y edición. **Néstor J. Aguirre:** conceptualización, logística, revisión y edición. **Mario A. Quijano-Abril:** revisión y edición. **José**

M. Rojas-Villa: investigación, revisión y edición. **Daniela Cardona:** investigación, revisión y edición. **Daniela Salazar:** investigación, revisión y edición. **Álvaro Wills:** conceptualización, investigación, escritura, borrador original, supervisión.

■ AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo se llevó a cabo gracias a la financiación del fondo CODI, Universidad de Antioquia, bajo el Fondo de Apoyo al Primer Proyecto de Profeso-

res. Adicionalmente, los autores agradecen el apoyo de las actividades en campo a Libia Oviedo y Wilson Pérez, pobladores de la zona de muestreo.

■ LITERATURA CITADA

Borges, J., Rosinski, M., de Jesús, M., Pedrociane, D.; Alves, J., Pucci, A., Zucchi, N. Barbosa, C., Aquino, S. and Lima, H. (2013). Influence of the hydrological cycle on physical and chemical variables of water bodies in the várzea areas of the middle solimoes river region (Amazonas, Brazil). UAKARI, 9(2), 75–90. <https://doi.org/10.31420/uakari.v9i2.149>

Borges, A. V., Darchambeau, F., Lambert, T., Morana, C., Allen, G. H., Tambwe, E., Toengaho Sembaito, A., Mambo, T., Wabakhangazi, J. N., Descy, J. P., Teodoru, C. R., and Bouillon, S. (2019). Variations in

dissolved greenhouse gases (CO₂, CH₄, N₂O) in the Congo River network overwhelmingly driven by fluvial-wetland connectivity. Biogeosciences, 16(19), 3801–3834. <https://doi.org/10.5194/bg-16-3801-2019>

Brito, J. G. de, Alves, L. F., and Espírito Santo, H. M. V. (2014). Seasonal and spatial variations in limnological conditions of a floodplain lake (lake Catalão) connected to both the Solimões and Negro Rivers, Central Amazonia. Acta Amazonica, 44(1), 121–133. <https://doi.org/10.1590/s0044-59672014000100012>

- Casanova, M. T., and Brock, M. A. (2000). How do depth, duration and frequency of flooding influence the establishment of wetland plant communities? *Plant Ecology*, 147(2), 237–250. <https://doi.org/10.1023/A:1009875226637>
- Chalarca, D., Mejía, R. y Aguirre, N. (2007). Aproximación a la determinación del impacto de los vertimientos de las aguas residuales domésticas del municipio de Ayapel, sobre la calidad del agua de la ciénaga. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 40, 41–58.
- Cunha, D. G. F., Calijuri, M. do C., and Lamparelli, M. C. (2013). A trophic state index for tropical/subtropical reservoirs (TSI_{tsr}). *Ecological Engineering*, 60, 126–134. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.07.058>
- Dadey, K. A., Janecek, T., and Klaus, A. (1992). Dry-bulk density: its use and determination. *Proc., Scientific Results, ODP, Leg 126, Bonin Arc/Trench System*, 126, 551–554. <https://doi.org/10.2973/odp.proc.sr.126.157.1992>
- Darrah, S. E., Shennan-Farpón, Y., Loh, J., Davidson, N. C., Finlayson, C. M., Gardner, R. C., and Walpole, M. J. (2019). Improvements to the Wetland Extent Trends (WET) index as a tool for monitoring natural and human-made wetlands. *Ecological Indicators*, 99(December 2018), 294–298. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.12.032>
- Departamento Nacional de Planeación, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2022). Documento CONPES 4076. DNP. <https://www.min-agricultura.gov.co/Normatividad/Conpes/CONPES%204076%20DE%202022.pdf>
- Dgebuadze, Y. Y., and Gladyshev, M. I. (2016). Biotic fluxes of matter and energy between aquatic and terrestrial ecosystems. *Contemporary Problems of Ecology*, 9(4), 391–395. <https://doi.org/10.1134/S1995425516040041>
- Dube, T., Pinceel, T., De Necker, L., Wepener, V., Lemmens, P., and Brendonck, L. (2019). Lateral hydrological connectivity differentially affects the community characteristics of multiple groups of aquatic invertebrates in tropical wetland pans in South Africa. *Freshwater Biology*, 64(12), 2189–2203. <https://doi.org/10.1111/fwb.13406>
- Earl, J. E., Castello, P. O., Cohagen, K. E., and Semlitsch, R. D. (2014). Effects of subsidy quality on reciprocal subsidies: How leaf litter species changes frog biomass export. *Oecologia*, 175(1), 209–218. <https://doi.org/10.1007/s00442-013-2870-x>
- Gardner, R. C., and Finlayson, M. (2018). Perspectiva mundial sobre los humedales. *Convección de Ramsar Sobre los Humedales*, 88. https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/gwo_s.pdf
- Hoyos, N., Escobar, J., Restrepo, J. C., Arango, A. M., and Ortiz, J. C. (2013). Impact of the 2010-2011 La Niña phenomenon in Colombia, South America: The human toll of an extreme weather event. Ap-

- plied Geography, 39(September 2011), 16–25. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2012.11.018>
- Junk, W. J., Piedade, M. T. F., Lourival, R., Wittmann, F., Kandus, P., Lacerda, L. D., Bozelli, R. L., Esteves, F. A., Nunes da Cunha, C., Maltchik, L., Schöngart, J., Schaeffer-Novelli, Y., and Agostinho, A. A. (2013). Brazilian wetlands: their definition, delineation, and classification for research, sustainable management, and protection. Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems, 24(1), 5–22. <https://doi.org/10.1002/aqc.2386>
- Junk, W. J., Piedade, M. T. F., Schöngart, J., and Wittmann, F. (2012). A classification of major natural habitats of Amazonian white-water river floodplains (várzeas). Wetlands Ecology and Management, 20(6), 461–475. <https://doi.org/10.1007/s11273-012-9268-0>
- Junk, W. J., and Wantzen, K. M. (2004). The flood pulse concept: new aspects, approaches and applications - an update. Proceedings of the Second International Symposium on the Management of Large Rivers for Fisheries, May, 117–149.
- Junk, W. J., Wittmann, F., Schöngart, J., Piedade, M. T. F., and Cunha, C. N. (2020). Large Rivers and their Floodplains. In Introducing Large Rivers (pp. 55–101). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118451410.ch5>
- Kayler, Z. E., Premke, K., Gessler, A., Gessner, M. O., Griebler, C., Hilt, S., Klemedtsson, L., Kuzyakov, Y., Reichstein, M., Siemens, J., Totsche, K. U., Tranvik, L., Wagner, A., Weitere, M., and Grossart, H. P. (2019). Integrating aquatic and terrestrial perspectives to improve insights into organic matter cycling at the landscape scale. Frontiers in Earth Science, 7(June), 1–14. <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00127>
- Let, M., and Pal, S. (2023). Socio-ecological well-being perspectives of wetland loss scenario: A review. Journal of Environmental Management, 326(PB), 116692. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116692>
- Mitsch, W. J., Bernal, B., and Hernandez, M. E. (2015). Ecosystem services of wetlands. International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services and Management, 11(1), 1–4. <https://doi.org/10.1080/21513732.2015.1006250>
- Montoya, y Aguirre. (2013). Dinámica fílicoquímica de las aguas de un sistema de planicies inundables tropicales. Revista Facultad de Ingeniería, 69, 256–273. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.18154>
- Moreira-Turcq, P., Bonnet, M. P., Amorim, M., Bernardes, M., Lagane, C., Maurice, L., Perez, M., and Seyler, P. (2013). Seasonal variability in concentration, composition, age, and fluxes of particulate organic carbon exchanged between the floodplain and Amazon River. Global Biogeochemical Cycles, 27(1), 119–130. <https://doi.org/10.1002/gbc.20022>
- Mori, G. B., Schietti, J., Poorter, L., and Piedade, M. T. F. (2019). Trait divergence and habitat specialization in trop-

ical floodplain forests trees. PLoS ONE, 14(2). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0212232>

Neiff, J. J. (2001). Diversity in some tropical wetland systems of South America. In B. Gopal, W. J. Junk, and J. Davies (Eds.), *Biodiversity in wetlands: assesment, function and conservation* (Vol. 2. 157-186).

Ordóñez, M. C., Bravo, I., y Figueroa, A. (2014). Flujo de Carbono Orgánico Total (COT) en una cuenca andina: caso subcuenca Río Las Piedras. Revista Ingenierías Universidad de Medellín, 13(24), 29–42. <https://doi.org/10.22395/rium.v13n24a2>

Pérez, C., Maurice, L., Ochoa-Herrera, V., López, F., Egas, D., Lagane, C., and Besson, P. (2015). Analysis of major cations in bottom sediments from oil impacted Rivers , in the Ecuadorian Amazon. Avances, 7(December), C 95-C 115.

Puerta, T. Y., Aguirre, N. J. y Vélez, F. de J. (2016). Sistema cenagoso de Ayapel como posible sitio Ramsar en Colombia. Gestión y Ambiente, 19(1), 110–122.

Reid, W. V. (2005). Ecosystems and human well-being: a report on the conceptual framework working group of the Millennium Ecosystem Assessment. In *Ecosystems*, 5(81).

Ricaurte, L. F., Olaya-Rodríguez, M. H., Cepeda-Valencia, J., Lara, D., Arroyave-Suárez, J., Max Finlayson, C., and Palomo, I. (2017). Future impacts of drivers of change on wetland ecosystem ser-

vices in Colombia. Global Environmental Change, 44, 158–169. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.04.001>

Ricaurte, L. F., Patiño, J. E., Zambrano, D. F. R., Arias-G, J. C., Acevedo, O., Aponce, C., Medina, R., González, M., Rojas, S., Flórez, C., Estupinan-Suarez, L. M., Jaramillo, Ú., Santos, A. C., Lasso, C. A., Nivia, A. A. D., Calle, S. R., Vélez, J. I., Acosta, J. H. C., Duque, S. R., ... Junk, W. J. (2019). A Classification System for Colombian Wetlands: an Essential Step Forward in Open Environmental Policy-Making. *Wetlands*, 39(5), 971–990. <https://doi.org/10.1007/s13157-019-01149-8>

Rivera-Gómez, M., Giraldo, A., and Lavanegos, B. E. (2019). Structure of euphausiid assemblages in the Eastern Tropical Pacific off Colombia during El Niño, La Niña and Neutral conditions. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 516(April), 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2019.04.002>

Rodríguez, W. y Barrera, J. A. (2006). Lineamientos generales de manejo y conservación del complejo de humedales de Ayapel, Departamento de Córdoba, Colombia. Universidad de Antioquia.

Rúa, A. F., Flórez, M. T. y Palacio, J. (2013). Variación espacial y temporal en los contenidos de mercurio, plomo, cromo y materia orgánica en sedimento del complejo de humedales de Ayapel, Córdoba, noroccidente colombiano. *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*, 69, 244–255.

Shafi, A., Chen, S., Waleed, M., and Sajjad, M. (2023). Leveraging machine learning and remote sensing to monitor long-term spatial-temporal wetland changes: Towards a national RAMSAR inventory in Pakistan. *Applied Geography*, 151(December 2022), 102868. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2022.102868>

Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres. (UNGRD). (2021). Boletín Informativo No. 120 Gobierno nacional responde de manera inmediata y articulada ante emergencia en “Cara de Gato”. UNGRD.

Vital, H., and Stattegger, K. (2000). Major and trace elements of stream sediments from the lowermost Amazon River. *Chemical Geology*, 168(1–2), 151–168. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(00\)00191-1](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(00)00191-1)

Witkowski, A., Cedro, B., Kierzek, A., and Baranowski, D. (2009). Diatoms as a proxy in reconstructing the Holocene environmental changes in the south-western Baltic Sea: The lower Rega River Valley sedimentary record. *Hydrobiologia*, 631(1), 155–172. <https://doi.org/10.1007/s10750-009-9808-7>

Xiang, H., Zhang, Y., and Richardson, J. S. (2016). Importance of Riparian Zone: Effects of Resource Availability at Land-water Interface. *Riparian Ecology and Conservation*, 3(1), 1–17. <https://doi.org/10.1515/remc-2016-0001>

Zabala, A. M., Hernández, E., Agudelo, D. M., Aguirre, N. J. y Vélez, F. D. J. (2019). Variación temporal de la morfología funcional del fitoplancton en una planicie inundable del Caribe Colombiano. *Biota Colombiana*, 20(2). <https://doi.org/10.21068/c2019.v20n02a01>

 **Conflict of interests**
Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.



Licencia de Creative Commons

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



Fecha de recibido:13-03-2023
Fecha de aceptado:10-07-2023
DOI: 10.22490/21456453.6719

LA GESTIÓN DE LOS PROYECTOS CONSTRUCTIVOS MEDIANTE UNA VISIÓN HOLÍSTICA DE LA SOSTENIBILIDAD

CONSTRUCTION PROJECT MANAGEMENT THROUGH A HOLISTIC VIEW OF SUSTAINABILITY

Nelson Javier Cely Calixto ¹

Romel Jesús Gallardo Amaya²

Carlos Alfonso Zafra Mejía ³

¹ Magíster en Obras Hidráulicas, Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta, Colombia. nelsonjaviercc@ufps.edu.co

² Magíster en Geotecnia, Universidad Francisco de Paula Santander, Ocaña, Colombia. rjgallardoa@ufps.edu.co

³ Doctor en Ingeniería Ambiental, Universidad Distrital Francisco José de Caldas Bogotá, Colombia. czafra@udistrital.edu.co

Citación: Cely, N., Gallardo, R. y Zafra, C. (2024). La gestión de los proyectos constructivos mediante una visión holística de la sostenibilidad. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 15(2), 211-236. <https://doi.org/10.22490/21456453.6719>

■ RESUMEN

Contextualización: el sector de la construcción cada día está innovando en la postulación y creación de nuevos proyectos responsables con el ambiente, a fin de mitigar las alteraciones negativas producidas por los procesos que se llevan a cabo en la elaboración y levantamiento de estructuras.

Vacío de conocimiento: por esta razón, el campo de esta investigación tiene como objetivo describir la triada de la sostenibilidad en la gestión de los proyectos de construcción, que conllevan un resultado exitoso de un proyecto industrial sostenible.

Propósito: El trabajo tiene como propósito fundamental la incorporación de los enfoques de economía, ambiente y sociedad a las prácticas conocidas de la gestión de proyectos de obras civiles.

Metodología: la metodología empleada en el presente manuscrito fue cualitativa y se aplicó el análisis documental descriptivo correlacional, para identificar y analizar los indicadores de mayor importancia

en la gestión de proyectos constructivos con un enfoque de sostenibilidad. La investigación permitió distinguir un considerable número de indicadores clave que se utilizan en el argot actual y que podrían implementarse en los nuevos proyectos con el propósito de buscar sinergias holísticas que mitiguen la incertidumbre de las metas propuestas.

Resultados y conclusiones: como resultado se obtuvo la identificación y categorización de los factores de medición con el propósito de facilitar la conceptualización y consideración en las prácticas de sostenibilidad para los gerentes de proyecto. Con este estudio se contribuye al mapeo de oportunidades de mejora en la sostenibilidad de los proyectos constructivos a partir de la gestión de indicadores, y se resalta la pertinencia de la gestión sostenible para la industria de la construcción.

Palabras clave: gestión de proyectos constructivos, holística en la construcción, indicadores de sostenibilidad, triada de la sostenibilidad

ABSTRACT ■

Contextualization: the construction sector is innovating every day in the postulation and creation of new environmentally responsible projects, to mitigate the negative alterations produced by the processes carried out in the elaboration and erection of structures.

Knowledge gap: for this reason, the field of this research aims to describe the triad of sustainability in the management of construction projects, leading to a successful outcome of a sustainable industrial project.

Purpose: the fundamental purpose of the work is to incorporate the economic, environmental, and social approaches to the known practices of civil works project management.

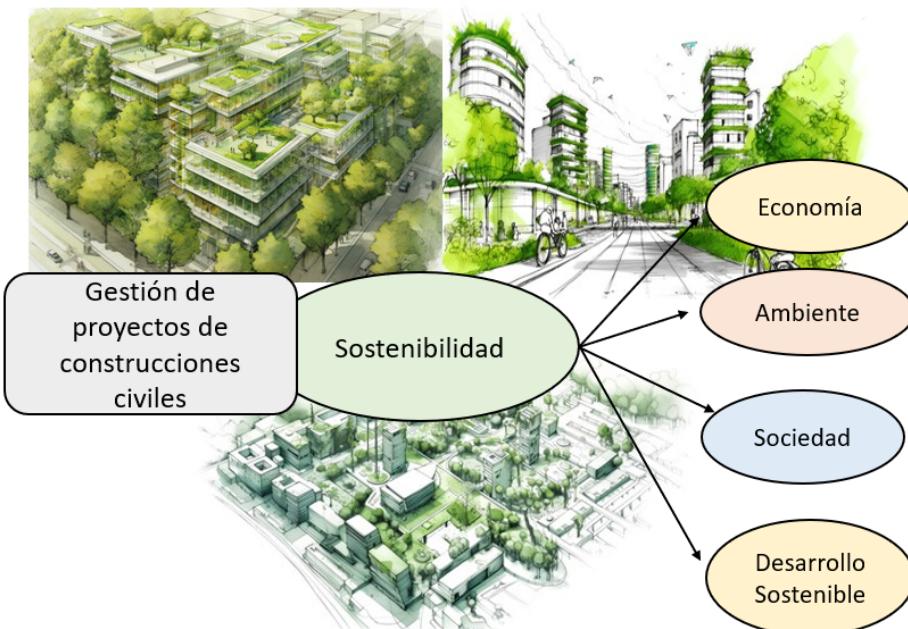
Methodology: the methodology used in this manuscript was qualitative and descriptive correlational documentary analysis was applied to identify and analyze the most important indicators in the management of construction projects with a focus

on sustainability. The research allowed distinguishing a considerable number of key indicators that are used in the current jargon and that could be implemented in new projects with the purpose of seeking holistic synergies that mitigate the uncertainty of the proposed goals.

Results and conclusions: as a result of this study, measurement factors were identified and categorized in order to facilitate the conceptualization and consideration of sustainability practices for project managers. This study contributes to the mapping of opportunities for improvement in the sustainability of construction projects based on the management of indicators and highlights the relevance of sustainable management for the construction industry.

Keywords: construction project management, holistic approach to construction, sustainability indicators, sustainability triad

■ RESUMEN GRÁFICO



Fuente: autores.

1 INTRODUCCIÓN

La sostenibilidad en los proyectos de construcción es un tema ampliamente estudiado y discutido en la actualidad desde el ámbito académico, investigativo e industrial. En esta investigación se entiende el desarrollo sostenible como aquel que logra satisfacer las necesidades presentes sin presuponer el riesgo futuro de una generación, en cumplimiento de los requerimientos de esa necesidad vincu-

lante actual (Ruggerio, 2021). Este desarrollo se ha visto bajo la perspectiva de la triada sostenible, siendo imperativa su aplicación en las dimensiones económica, medioambiental y social, lo cual es ampliamente aceptado en la actualidad (Silva *et al.*, 2020).

Ahora bien, la sostenibilidad en los proyectos de construcción ha evolucionado hacia la integración de la gestión de la

sostenibilidad, sin embargo, en el caso de las regiones del tercer mundo son subestimados sus tres componentes en el contexto de la gestión de indicadores que garanticen el éxito del proyecto, las ventajas competitivas y los créditos económicos pretendidos por este tipo de industrias (Khan *et al.*, 2021). De acuerdo con esto, la coordinación de los procesos civiles, recursos, metodologías e indicadores en un proyecto (Hicksa *et al.*, 2019) hacen parte de la cosmovisión determinista de la ingeniería, por ende, surge la necesidad de albergar de manera holística el enfoque de la sostenibilidad en los proyectos de construcción: en primer lugar mostrando las perspectivas de los componentes, social, ambiental y económico, seguido del ciclo de vida del proyecto enmarcado en horizontes del largo plazo, además de involucrar a las partes interesadas e integrar la sociedad desde el cliente interno al cliente externo, en un argumento ético de sostenibilidad durante todas las fases del proyecto, es decir, la planificación, el seguimiento y el control (Faris *et al.*, 2020). No obstante, de forma integral, el proyecto será sostenible en la construcción una vez que se diseñe, conforme y apliquen indicadores a la gestión de los componentes de sostenibilidad, para ello, de acuerdo con Domínguez *et al.* (2018), el indicador se abordará desde la compresión de señales medibles en el proceso constructivo del proyecto, lo que significa que el indicador en su grado más genérico debe poder limitarse en su alcance y del cual se analiza y toman decisiones basadas en el desempeño.

El enfoque holístico del presente estudio es el descubrir la importancia efectiva de la gestión de proyectos constructivos a través de los componentes de la sostenibilidad; en segundo lugar, sugerir el mapeo central de oportunidades de mejora en la sostenibilidad del proyecto constructivo y exponer mediante datos explorados por diversos teóricos la pertinencia de la gestión sostenible en la construcción. Es necesario tener presente que los proyectos constructivos están guiados por indicadores específicos que permiten lograr objetivos establecidos en cada empresa u organización, con el fin de crear un equilibrio en los componentes económico, ambiental y social (Kim *et al.*, 2015). En la búsqueda de señalar estos indicadores se realiza una revisión de literatura, por tal motivo se analiza la sinergia de la perspectiva de sostenibilidad y los escenarios de los componentes de sociedad, medioambiente y economía; de acuerdo con esto, el objetivo principal del manuscrito es evaluar la sostenibilidad de proyectos constructivos mediante indicadores, recopilando y seleccionando los de mayor injerencia en la contribución en las industrias de obras civiles.

Revisión literaria

La revisión literaria tiene como propósito describir antecedentes que indiquen algunos de los aspectos positivos o negativos de los componentes de sostenibilidad, a fin de crear un enfoque crítico. Para esto, se toman en cuenta aspectos como la gestión constructiva sostenible y los indicadores de sostenibilidad: el económico,

social y ambiental. Así, en este manuscrito se evaluaron 61 indicadores por distintos autores y se identificó un enfoque holístico en las edificaciones para obtener un criterio en la toma de decisiones en cada proyecto. Cabe resaltar que los vínculos

de sostenibilidad se centran plenamente en tres objetivos, la eficiencia ecológica, la equidad social y la eficiencia económica; así mismo, analiza la interrelación de los tres componentes con los proyectos (Figura 1) (García *et al.*, 2006).

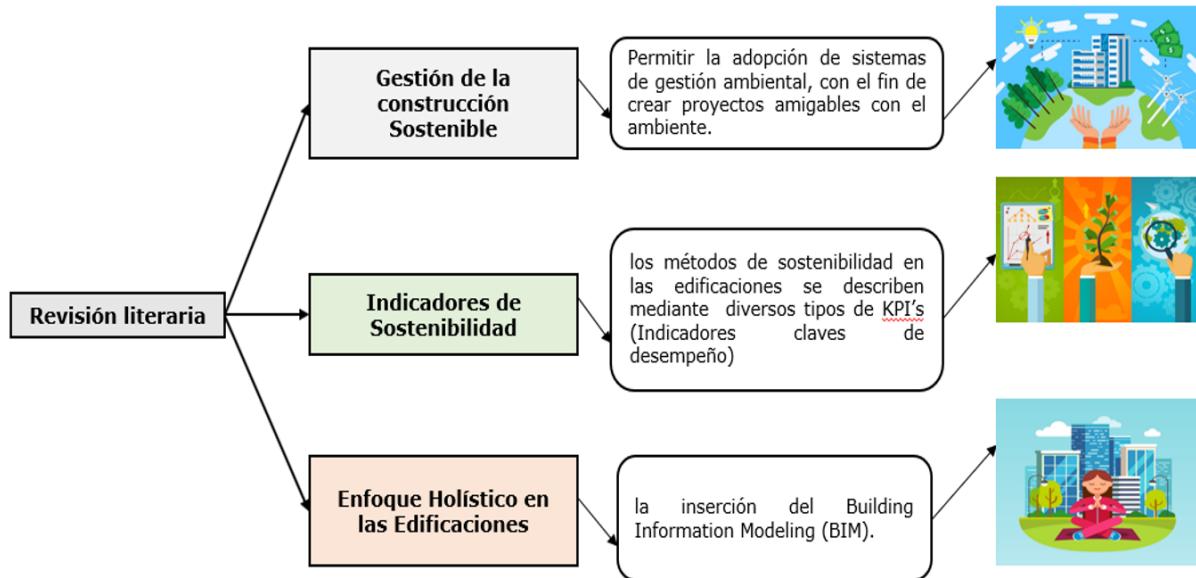


Figura 1. Diagrama gráfico de revisión literaria

Fuente: autores.

Gestión de la construcción sostenible

En la industria de la construcción se emplea una cantidad considerable de recursos, que impactan el contexto en donde se desarrolla (Okudan *et al.*, 2021). Sus acciones son personalizadas y, por ende, son de especial interés al momento de acudir a las prácticas de desarrollo y sostenibilidad, ya que se trata de una industria con efectos de un elevado capital de trabajo en su ejecución (Chen *et al.*, 2019). En este sentido, el impacto en los países en vía

de desarrollo se convierte en una de las principales coyunturas a resolver, dado que se propende con especial urgencia en la minimización en la administración del consumo energético, hídrico y material, a favor de conseguir altos niveles de rentabilidad a la vanguardia de la globalización (Goel *et al.*, 2019). Es importante resaltar que los indicadores económicos de sostenibilidad reflejan la síntesis cuantitativa, significativa y legítima de la viabilidad de los proyectos u otras actividades que se puedan relacionar con crear un ambiente sostenible (Sancho *et al.*, 2017).

La priorización en la resolución de las brechas del capital y el medio ambiente en los proyectos de construcción ha permitido la adopción de sistemas de gestión ambiental que han quedado obsoletos o limitados en confrontación a los retos y riesgos no identificados mediante este tipo de métodos de control (Shojaei *et al.*, 2018). A raíz del uso de sistemas incipientes, la implementación de la ISO 14004, 14042 y 14043 se han propuesto como una adopción sugerida en la literatura con el fin de sintetizar factores como las emisiones de gases de efecto invernadero, efectos en las cuencas hídricas, vegetales y humanas, afectaciones al suelo, entre otras (Araujo *et al.*, 2020). El indicador social se fundamenta y de igual manera se prioriza la relación conjunta de las personas que rodea, sus formas de organización, sus interacciones, la participación en la toma de decisiones y la distribución o redistribución de los beneficios del desarrollo (Puentes *et al.*, 2021).

Indicadores de sostenibilidad

A lo ancho de la literatura y de los métodos de sostenibilidad en las edificaciones se describen diversos tipos de indicadores (KPIs) que son útiles, no solo para los proyectos, sino en la toma de decisiones en tiempo real (Sharma, 2019). Cabe aclarar que su aplicación y efectividad dependerá de múltiples factores, es decir, la demostración de estos en el campo de estudio aún se encuentra en investigación (Sala *et al.*, 2020). En la literatura se describen KPIs cuantitativos en cuanto al uso

eficiente de la energía, medición tarifaria y otros no energéticos como los indicadores del entorno (Santoli, 2019), el rendimiento ambiental se focaliza o se centra en medir la función ambiental de cada alternativa propuesta (Soria *et al.*, 2015).

Algunas de las manifestaciones de los KPIs son la dificultad en su agrupación integral a un factor especial, ejemplo de ello, son los energéticos que son distribuidos de acuerdo con la necesidad de medición con relación a la fiabilidad, calidad, interacción, consumo, demanda, etc. (Lima *et al.*, 2021); por tanto, el analista deberá ser meticuloso y establecer criterios de confiabilidad en la selección. Al Dakheel *et al.* (2020), indican que se puede optar porque estos sean comparables, confiables, familiares, medibles e integralmente holísticos, sin embargo, requerirían de experimentación en casos reales para exponer su funcionamiento y efectividad, por lo tanto, cabe resaltar que la sostenibilidad “es la correlación que existe entre los sistemas humano y ecológico, y que logra mejorar y desarrollar la calidad de vida, conservando en el mismo lapso, la estructura, las funciones y la diversidad de los sistemas que sustentan la vida” (Ordoñez *et al.*, 2015).

Enfoque holístico en las edificaciones

La complejidad de los sistemas de construcción ha suscitado el interés por una visión global, para ello es necesaria la aplicación de tecnologías innovadoras,

entre estas la inserción del Building Information Modeling (BIM, por sus siglas en inglés), la integración del diseño de procesos, la sostenibilidad y los sistemas de pensamiento (Mortaheb y Mahpour, 2016); por lo que dentro de estos procesos se incluyen la planeación, estimación, determinación y el control de cada proyecto de construcción (Porras *et al.*, 2015).

De modo que, desde una concepción global de los proyectos de construcción, su complejidad se basa en un esfuerzo conjunto por las interacciones sinérgicas de las metodologías reseñadas anteriormente (Asnaashari, 2011). Inicialmente, dichas combinaciones parciales o globales se fundamentan en el pensamiento crítico y se amplían a una filosofía aplicada, a través de métodos de ingeniería funcionales, con el propósito de resolver sistemas constructivos de alta complejidad, incertidumbre y mutables (Baduge *et al.*, 2022). Se cree que es evidente que esta cosmovisión tiende a mitigar la incertidumbre del proyecto desde las partes al todo que lo conforman para

su uso, lo que significa que un enfoque holístico es la búsqueda efectiva y armónica de las fortalezas, debilidades, decisiones y potenciales impactos de los flujos de trabajo aguas arriba y aguas abajo del proyecto (Maher *et al.*, 2018).

En efecto, la integración de estrategias en la sostenibilidad constructiva mediante el involucramiento de medidas y señales oportunas en el tiempo favorecen la orientación de los programas, la materialidad, los componentes y las actividades del usuario (Akhimien *et al.*, 2020). Estas implicaciones de acuerdo con Kamari *et al.* (2020), se convierten así en el involucramiento corporativo del cliente interno, cliente externo, contratistas, sociedad, profesionales de la construcción y entidades gubernamentales, cuyo esfuerzo se orienta a la agilidad y simplicidad de las partes involucradas, entendidas como métodos, criterios, personas, etc., para el logro exitoso del proyecto en forma completa y coordinada.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

El método de revisión sistemática estándar de artículos científicos

Se inició una revisión sistemática mediante el método PRISMA, el cual comen-

zó recopilando información en el software Science Direct y Web of Science, al digitar el término “sostenibilidad” arrojo un valor de 2.133 documentos relacionados, que posiblemente se puedan usar para adquirir información relacionada. Otra palabra clave para la investigación fue

“proyectos constructivos”, del cual se obtuvo un valor de 278 documentos claves para la recopilación de datos, obteniendo un total de 2411 documentos; de estos archivos se seleccionaron 356 que aparen-

temente cumplían con las expectativas y fueron filtrados mediante el proceso de revisión sistemática para la conformación del artículo científico (Figura 2).

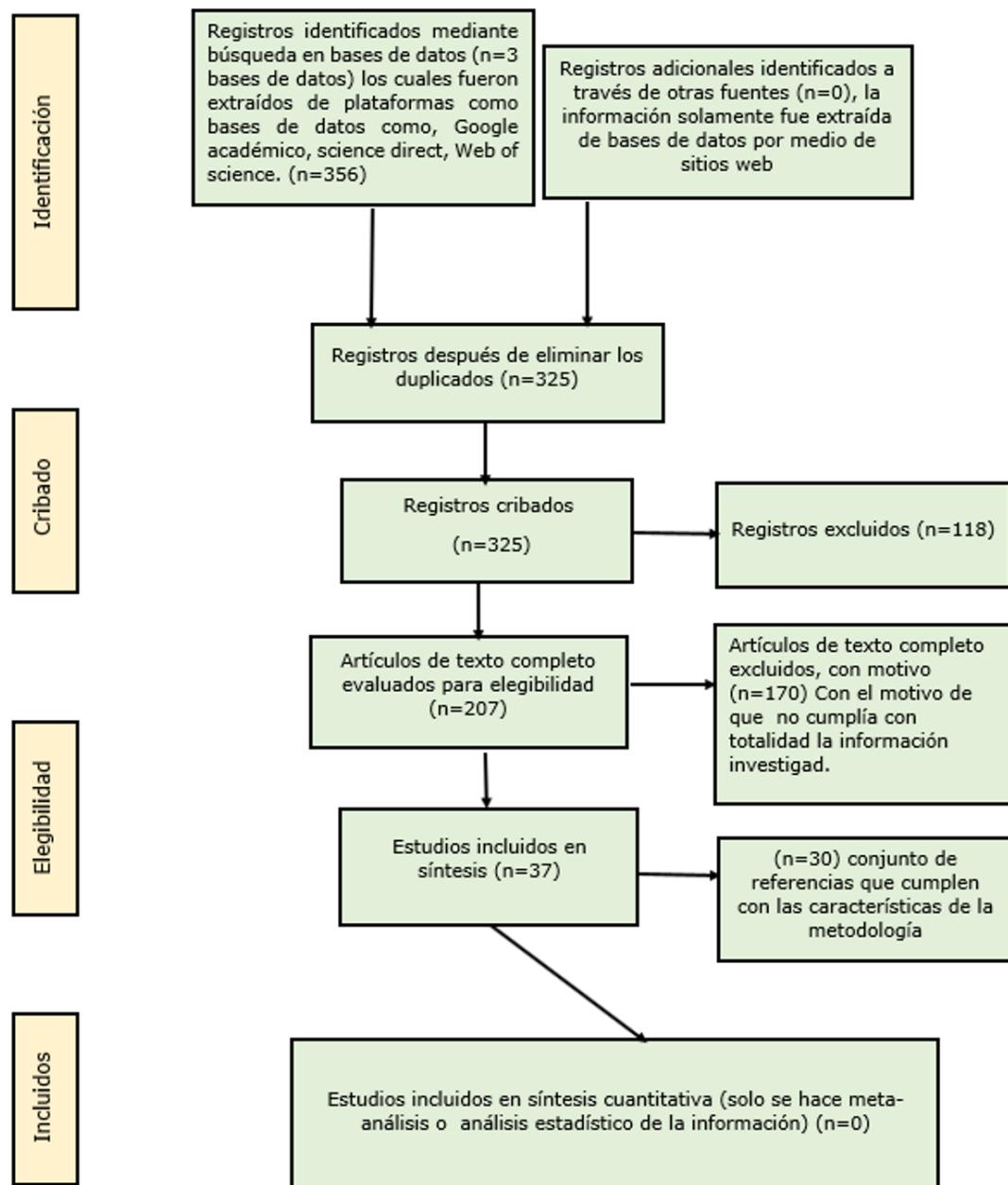


Figura 2. Diagrama de Flujo revisión sistemática estándar de artículos

Fuente: autores.

La metodología empleada en la presente investigación es del orden documental descriptivo correlacional, dirigido a identificar y analizar los indicadores de mayor importancia en la gestión de proyectos constructivos con un enfoque de sostenibilidad. El documento se efectuó por medio de estudio, recuperación, selección y análisis de otras investigaciones previamente informadas en la literatura.

En primer lugar, se describen los manifiestos que posibilitan los conocimientos teóricos del objeto de estudio, en lo que respecta a la gestión de proyectos constructivos de índole sostenible desde la holística del método. La metodología empleada se

puede observar en el diagrama de la Figura 3. Inicialmente se realiza identificación de los términos clave y se establecen los criterios de búsqueda, seguidamente se fundamentan las ecuaciones de búsqueda en las bases de datos científicas Science Direct y Web of Science, al ser consideradas entre las más mencionadas en el argot científico e investigativo. Posteriormente se realizó condensación de aquellas fuentes que aportaron mayor grado injerencia hacia el tema tratado, teniendo en cuenta criterios como el periodo de publicación, propósito del trabajo, fuentes duplicadas, periodicidad inferior a cinco años y confiabilidad de la información.

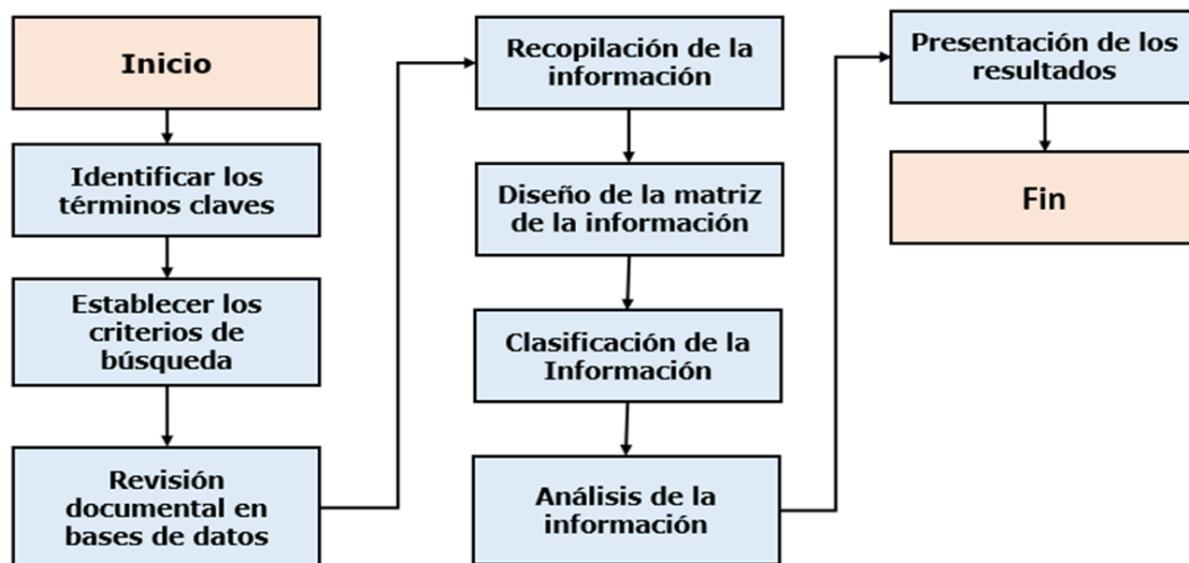


Figura 3. Diagrama metodológico

Fuente: autores.

Las investigaciones literarias seleccionadas se agrupan en un conjunto de 30 referencias, las cuales cumplen con las

características específicas mencionadas anteriormente, la gestión de proyectos constructivos, sus indicadores de gestión

y la visión holística de la sostenibilidad. La identificación y análisis se lleva a cabo con el fin de reseñar los factores de conveniencia del marco teórico, en los que se especifica la conceptualización y holística de la gestión de los proyectos en el marco de las construcciones. Se hizo imperativo considerar el escenario y proceder de oportunidades para la mejora en la sostenibilidad del proyecto constructivo, así como la pertinencia de la gestión sostenible en el entorno latinoamericano.

Este artículo se podría convertir en una herramienta de información para aquellos interesados en la temática de construcciones u obras civiles de relativa importancia a nivel nacional y regional, gracias al contenido del pensamiento crítico y el marco genérico al que se alude a sintetizar las definiciones de los componentes de la sostenibilidad en la gestión de los proyectos, en la dirección del desarrollo sostenible en las organizaciones y, en especial, enmarcado en la ingeniería civil.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN 3

La revisión sistemática de la literatura ha sido un método eficaz en la identificación de indicadores propios en la gestión holística de los proyectos constructivos (Hicks *et al.*, 2019). Según lo relatado en los antecedentes investigativos, a partir de un panorama en el alto nivel

de la administración del proyecto, dichos indicadores pueden verse aceptados de manera general por la industria. Para lo que es necesario mantener la objetividad en relación con factores como la cultura, la conciencia, la voluntad y el estado (Shi *et al.*, 2023).

■ **Tabla 1.** Indicadores de la sostenibilidad económica

Indicador	Descripción	Referencia
Desempeño económico	Rendimiento de las inversiones, viabilidad, flujo de caja del proyecto y solvencia	Adelina and Roxana (2016)
Estabilidad financiera y política	Los efectos políticos son correspondientes, ya que la inversión y el riesgo aumentan con la inconsistencia política	Altamirano and Martínez (2021)

Involucramiento de las partes interesadas	Participación de las partes involucradas en la iniciación y culminación del proyecto, conciben escenarios de logro	Rajabi and Romdhane (2022)
Gestión de la innovación	Se refiere a las prácticas de innovación de productos, procesos y organizaciones a través de I+D+i	Lima <i>et al.</i> (2021)
Mercadeo del proyecto	Orientado a la generación de valor en el producto o servicios según el mercado objetivo	Okudan <i>et al.</i> (2021)
Control efectivo del proyecto	Es la data de los componentes de tiempo, procesos, riesgos, costos, rendimientos, procesos administrativos, etc.	Silva <i>et al.</i> (2020)
Estrategias de mejora	Son todos los procesos, procedimientos y prácticas que se integran a la gestión en el ciclo PHVA	Rajabi and Romdhane (2022)
Asignación eficiente de recursos	Eficiencia en la distribución, manejo y utilización de los recursos empleados	Walker <i>et al.</i> (2020)
Tecnologías de gestión de infraestructura	Todos aquellos procedimientos orientados a la construcción, mantenimiento, renovación y prácticas de las 3R en edificaciones	Sala <i>et al.</i> (2020)
Planificación de recursos	Gestión de la organización mediante la priorización de lo planificado	Altamirano and Martínez (2021);
Cultura organizacional	En la colectividad organizacional se han desarrollado valores, principios y creencias que conforman la ética empresarial	Okudan <i>et al.</i> (2021)

Parámetros de gestión eficiente	Se refiere al alcance tiempo y costo del proyecto	Silva <i>et al.</i> (2020)
Capacidad de pago y accesibilidad	Suficiencia económica para la desarrollo y mantenimiento del proyecto constructivo	Sharma (2019)
Contabilidad sostenible	Armonización de la data económica, ambiental y social en búsqueda de los objetivos del proyecto	Santoli (2019)
Gestión eficiente de riesgos	Las variables que pueden afectar el proyecto deben monitorearse mitigando su incertidumbre	Sala <i>et al.</i> (2020)
Eficiencia en la toma de decisiones	Se trata del procesamiento de datos a través del planteamiento de alternativas basados en la información	Sharma (2019)

Fuente: autores.

En relación con lo planteado, este se convierte en un documento útil en la dirección del enfoque gerencial de los proyectos con miras al éxito de la gestión sostenible (Braulio *et al.*, 2022). Ahora bien después de realizar la depuración en el registro de indicadores clave orientada a la triada de la sostenibilidad se reducen a 61 los indicadores, categorizándose en componentes económico, medio ambiente y

sociedad, categorización que se logra en la intersección de la literatura sujeta a los cuestionamientos directivos que los describen; es decir, si la investigación hace énfasis sobre los factores, deliberadamente se clasifica bajo esta arista, de no ser así, el equipo investigativo valora el indicador de la triada con mayor importancia. Cabe aclarar que el orden que secundan los indicadores carece de jerarquía.

■ Tabla 2. Indicadores de la sostenibilidad ambiental

Indicador	Descripción	Referencia
Eficiencia energética	Se refiere a la distribución y transmisión de la energía a través de medidas que permitan la minimización del consumo para las mismas tareas	Walker <i>et al.</i> (2020)
Recursos energéticos disponibles	Tiende a la búsqueda y selección de recursos energéticos responsables con el medio ambiente	Ali <i>et al.</i> (2023)
Ecoeficiencia	Se orienta a las prácticas y modelos en la gestión empresarial verde	Yi and Lim (2021)
Uso sostenible de los recursos naturales	Las entradas y salidas del sistema tienden a la minimización a través de la trasversalidad de prácticas R	D'Inverno <i>et al.</i> (2020)
Tecnologías y métodos ambientales	Los procesos garantizan la sostenibilidad del ciclo de vida del proyecto	Braulio <i>et al.</i> (2022)
Responsabilidad ambiental	Trata de la cooperación de las partes interesadas por la sostenibilidad ambiental	CEPAL (2018)
Impacto en la calidad del agua	Antes, durante y después del ciclo de vida del proyecto constructivo se apliquen medidas de manejo integral del agua	D'Inverno <i>et al.</i> (2020)
Sistemas de gestión ambiental	Se refiere a la administración y minimización del impacto negativo de las operaciones en el medio ambiente	D'Inverno <i>et al.</i> (2020)
Solucionar cuellos de botella	A fin de facilitar la consecución de los objetivos ambientales mediante la explotación de los recursos disponibles del proyecto	Mahmoodi and Ghobakhloo (2022)

Gestión de los cambios ambientales	Desarrollo inteligente en la gestión de los riesgos y objetivos ambientales	Ali <i>et al.</i> (2023)
Diseño ambientalmente responsable	Enfoque ambiental basado en parámetros en la reducción de desastres	Ali <i>et al.</i> (2023)
Biodiversidad del proyecto	Protección del ecosistema de forma global	Mahmoodi and Ghobakhloo (2022);
Educación ambiental	Generación de habilidades y capacidades ambientales a favor de la solución de los problemas ambientales en una cosmovisión holística	Braulio <i>et al.</i> (2022)
Impactos ambientales en el ciclo de vida del proyecto	Se refiere al análisis de ingeniería inversa, montaje, desmontaje y ciclo de vida del proyecto	Yi and Lim (2021)

Fuente: autores.

En el aspecto económico (Tabla 1) resalta la sostenibilidad medida en los proyectos de ingeniería y viabilidad financiera, de allí que desde este factor puede estimarse que un proyecto de construcción es viable para la inversión en estimación de la multi variabilidad que se ha incrementado en un horizonte de planeación específico (Mortaher y Mahpour, 2016). Además, es ambientalmente sostenible en la calidad para la generación de valor ambiental en el entorno de ejecución y en la prestación incremental de componentes de ventaja en el impacto que este pudiera acusar (Silva *et al.*, 2020); razón por la cual la planificación ambiental (Tabla 2) es una

práctica común en el contexto universal y en Latinoamérica. A su vez, al integrarse adecuadamente con la valoración en la gestión se permite la trascendencia a lo intangible, que es beneficiosa para la sociedad (Walker *et al.*, 2020). De esta manera las partes interesadas e involucrados directa o indirectamente tienden a la generación de riquezas materiales, comerciales y económicas (Gholipour *et al.*, 2022). Por su parte, en el factor social (Tabla 3) la transmisión asertiva de las formas de comunicación y el clima integral del trabajo son dos de los aspectos clave en el éxito de los proyectos (Sophie *et al.*, 2022).

Tabla 3. Indicadores de la sostenibilidad social

Indicador	Descripción	Referencia
Responsabilidad social	Se refiere a las prácticas, competencia y costos con transparencia en favor de los intereses sociales	Shi <i>et al.</i> (2023)
Financiamiento social	Estimaciones e inclusión presupuestal para las acciones sociales	He <i>et al.</i> (2022)
Integración socio natural	Todas las formas que permiten las sinergias de la triada de la sostenibilidad	Gholipour <i>et al.</i> , (2022)
Prácticas laborales	Se trata de las relaciones de empleabilidad, capacitación, educación, entorno laboral e integralidad en las fases de gestión del equipo del proyecto	Sophie <i>et al.</i> (2022)
Evaluación social	Comprendión y análisis de las necesidades del entorno social esperado	Custodio <i>et al.</i> (2023)
Empleo sostenible	Inclusión en la empleabilidad del talento joven y escenarios en la creación de trabajos verdes	He <i>et al.</i> (2022)
Derechos Humanos	Se refiere a la gestión social, principios morales y estándares regulados por el derecho nacional e internacional	Ruggerio (2021)
Independencia del proyecto	Los factores externos políticos no pueden primar por encima del interés colectivo de la sociedad	Kamari <i>et al.</i> (2020)
Informes sociales	La data social a través del análisis estadístico	Shen and Li (2023)
Procesos de transparencia	La transparencia entre proveedores y clientes primará mediante procesos tecnológicos y culturales que lo garanticen	Hicks <i>et al.</i> (2019)

Ausencia de burocracia	Entrega oportuna y eficiente a la sociedad de los entregables del proyecto	Goel <i>et al.</i> (2019)
Relación contratis-ta-proveedor	Mejoras en las relaciones para la cadena de suministro mediante procesos de estabilidad sostenible	Othman <i>et al.</i> (2020)
Alcance y limitaciones del proyecto	Se refiere a la planeación del proyecto de forma concreta y delimitada	Kamari <i>et al.</i> (2020)
Estrategia de beneficios holísticos	La búsqueda de la optimidad del proyecto se ejecutará por medio de la estrategia	Chen <i>et al.</i> (2019)
Calidad en la mano de obra	Se trata de las propiedades tangibles en las características del personal en relación con saberes, habilidades y experiencias	Chen <i>et al.</i> (2019)
La competitividad como filosofía	La maximización de la productividad se encmarcará en las sinergias del trabajo en equipo y la cooperación	Gholipour <i>et al.</i> (2022)
Aplicación de sistemas de gestión de calidad	Se trata del logro en el aseguramiento de la calidad	Ruggerio (2021)
Transformación cultural	La gestión y aseguramiento de los resultados, procesos y riesgos es responsabilidad de todos	Othman <i>et al.</i> (2020)
Integralidad en la contratación	Incluye además de los términos generales del documento, las atribuciones integrales, en cuanto a seguros, riesgos, condiciones especiales y actividades	Sophie <i>et al.</i> (2022)
Licitación del proyecto	La generación del valor para el proyecto mediante procesos guiados a los objetivos deseados en la alta dirección	Baduge <i>et al.</i> (2022)

Adaptabilidad del proyecto	Se refiere a la capacidad de cambio con relación a los atributos del entorno, tecnologías, personas y contextos	Akhimien <i>et al.</i> (2020)
Gestión de activos intangibles	Intangibles tales como derechos de patente, registros de marca, nombres comerciales, entre otros	Custodio <i>et al.</i> (2023)
Multidisciplinariedad en la gestión del proyecto	El éxito del proyecto depende de las experiencias multifactoriales que impactan la gestión	Shen and Li (2023)
La confianza en la gestión del proyecto	A mayor confianza el desempeño del proyecto puede mitigar la incertidumbre	Shi <i>et al.</i> (2023)
Modelo PHVA en el proyecto	Los procesos básicos de mejora procuran la mitigación de los bajos rendimientos	Yi and Lim (2021)
Estilo de liderazgo	La influencia entre niveles de la dirección buscará la plenitud en la visión y hallazgo del potencial en el personal	Akhimien <i>et al.</i> (2020)
Toma de decisiones	Los datos como mecanismo estructural a todo nivel de la decisión	Hicks <i>et al.</i> (2019)
Gestión del conocimiento en el proyecto	Indagación constante para la inmersión de nuevos aprendizajes, cuya permeabilidad en este y nuevos proyectos sea posible	Goel <i>et al.</i> (2019)

Fuente: autores.

Visto de esta forma, los indicadores en la gestión sostenible de los proyectos son una configuración de soporte de la mejora continua, que se asocia a la organización y grupos de interés con los aspectos mate-

riales (Rajabi and Romdhane, 2022); entre estos, los recursos técnicos, medioambientales, financieros, tecnológicos y gerenciales (Shen and Li, 2023). Como era de esperarse, los proyectos de construcción

terminan por aportar de manera significativa a la sociedad en la mutación urbana, espacial, arquitectónica, social y de desarrollo en el entorno en que se desenvuelve (D'Inverno *et al.*, 2020); es por eso por lo que, la sostenibilidad es holística al ser incluyente previamente a las etapas de prefactibilidad, inicial, ejecución y de finalización del proyecto (Goel *et al.*, 2019).

De la categorización holística propuesta desde los componentes de la sostenibilidad, el que se puede considerar con importancia relativa en su gestión es el factor social, en vista de que la información, los costos, las personas y las tecnologías implementadas, pueden impactar negativamente a las sociedades o antagónicamente ser positivas en la trasfiguración de escenarios exitosos y de beneficios gerenciales y éticos (Mahmoodi and Ghobakhloo, 2022). En la perspectiva presentada, la alta dirección al comprender las posibilidades

de la sostenibilidad en la extensión de metodologías integrales, como es el marco de indicadores encontrados, evidencia que es útil en el análisis e interpretación de mejores prácticas constructivas (Domínguez *et al.*, 2018). Por consiguiente, la investigación contribuye a que escenarios multifactoriales de subjetividad en el caso latinoamericano apuesten por la implementación de sistemas consensuados en la universalidad (Adelina and Roxana, 2016), debido a que, la holística es responsable de engranar sinergias de todas las partes al todo, repercutiendo así en una mayor probabilidad de éxito independiente de las atribuciones subjetivas que no son menos importantes o relevantes en la planeación sostenible (Santoli, 2019); no obstante, estas se transforman en pilares con transversalidad en los componentes de economía, ambiente y sociedad, en armonía con las facilidades de despliegue administrativo, técnico y gerencial.

CONCLUSIONES 4

La gestión holística de los proyectos de construcción implica considerar todos los aspectos del proyecto, incluidos los factores técnicos, financieros y sociales, para lograr un resultado exitoso. Este enfoque enfatiza la colaboración, la comunicación y el uso de las mejores prácticas en la gestión de proyectos, además de consi-

derar la sostenibilidad a largo plazo y el impacto del proyecto en la comunidad. Una gestión holística eficaz requiere un equipo de proyecto sólido, metas y objetivos claros, así como un seguimiento y evaluación regulares, para garantizar que el proyecto se mantenga encaminado y alcance los resultados esperados, visión a la

que optar en el contexto latinoamericano, en vista de que, este tipo de formas exteriores en la gestión favorecen la aplicabilidad objetiva al integrar en dicho sistema las variables que quizás un sistema de gestión ambiental no llegase a implicar.

Ahora bien, un proyecto de construcción se refiere a la planificación, coordinación y control de todos los procesos y recursos necesarios para llevar a cabo la obra de manera eficiente, esto significa gestionar adecuadamente los materiales, equipos, personal y transporte, para optimizar los plazos de entrega, reducir los costes y evitar el desperdicio. Una gestión logística eficiente puede contribuir a la rentabilidad y al éxito de los proyectos, al reducir retrasos, errores y gastos innecesarios.

Por otro lado, los indicadores de sostenibilidad son herramientas para medir y evaluar el desempeño ambiental, social y económico de los proyectos de construcción. Estos indicadores son esenciales para identificar y cuantificar los impactos ambientales y sociales de las actividades de construcción, así como para establecer metas y objetivos de mejora y promover la implementación de prácticas más sostenibles, como el uso eficiente de los recursos, la reducción de emisiones contaminantes, la gestión adecuada de los residuos y el fomento de la responsabilidad social, teniendo en cuenta los indicadores de sostenibilidad en la gestión de los proyectos de construcción.

Los indicadores de sostenibilidad como la cantidad de agua consumida, la hue-

lla de carbono y emisiones de dióxido de carbono durante el transporte de materia prima, brindan una forma medible de rastrear y evaluar los impactos ambientales, sociales y económicos del proyecto. De esta manera, pueden ayudar a garantizar que el proyecto se desarrolle de manera responsable y sostenible y, también, abonen en la identificación de áreas en las que se pueden realizar mejoras. Además, los indicadores de sostenibilidad hacen que un proyecto cumpla con los requisitos reglamentarios y se pueden usar para evaluar el desempeño general del proyecto a lo largo del tiempo. En general, el uso de indicadores de sostenibilidad contribuye a garantizar que los proyectos de construcción estén alineados con objetivos de sostenibilidad más amplios y promuevan la resiliencia y el bienestar social a largo plazo.

El factor social, que incluye la comunicación, el trabajo en equipo y el liderazgo, es crucial en la gestión de los proyectos de construcción. La comunicación efectiva entre los miembros del equipo, así como entre el equipo y las partes interesadas, garantiza que todos estén en sintonía y que cualquier problema o inquietud se aborde de manera oportuna. El trabajo en equipo permite el uso eficiente y efectivo de los recursos, mientras que un fuerte liderazgo asegura que el proyecto se mantenga encaminado y alcance sus objetivos. En general, el factor social juega un papel vital en el éxito de los proyectos de construcción, puesto que ayuda a garantizar que todos trabajen juntos hacia un objetivo común.

CONTRIBUCIÓN DE LA AUTORÍA ■

Cabe resaltar que todos los autores fueron partícipes en la elaboración de todo el documento.

Nelson Javier Cely Calixto: introducción, gestión de la construcción sostenible e indicadores de sostenibilidad. **Romel Je-**

sús Gallardo Amaya: enfoque holístico en las edificaciones y metodología. **Carlos Alfonso Zafra Mejía:** resultados y discusión, indicadores de sostenibilidad económica, indicadores de sostenibilidad ambiental e indicadores de la sostenibilidad social.

AGRADECIMIENTOS ■

Los autores manifiestan sus agradecimientos a la Universidad Francisco de Paula Santander, seccional Cúcuta y Ocaña; la Universidad Distrital Francisco José de Caldas por el apoyo y la participación en este artículo de estudio; así como a los

grupos de investigación en Hidrología y Recursos Hídricos (HYDROS), el grupo de investigación en construcción, geotecnica y medio ambiente (GICMA) y el grupo de Grupo de Investigación en Ingeniería Medioambiental (GIIAUD).

LITERATURA CITADA ■

Adelina, D., and Roxana, S. (2016). Indicadores económico-financieros-vectores de desempeño presupuestario. Estudio de caso Rumania. *Procedia Economía y Finanzas*, 39, 833–839. [https://doi.org/10.1016/s2212-5671\(16\)30262-3](https://doi.org/10.1016/s2212-5671(16)30262-3)

Akhimien, N. G., Latif, E., and Hou, S. S. (2021). Application of circular economy

principles in buildings: A systematic review. *Journal of Building Engineering*, 38(102041), 102041. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.102041>

Altamirano-Ávila, A., and Martínez, M. (2021). Evaluación de la sostenibilidad urbana de cinco ciudades latinoamericanas mediante el uso del índice

- SDEWES. *Revista de Producción más Limpia*, 287(125495), 125495. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125495>
- Al Dakheel, J., Del Pero, C., Aste, N., and Leonforte, F. (2020). Smart buildings feature and key performance indicators: A review. *Sustainable Cities and Society*, 61(102328), 102328. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102328>
- Ali, B., Hedayati-Dezfooli, M. y Gamil, A. (2023). Evaluación de la sostenibilidad de las vías de generación de energía de energía alternativa a través del desarrollo de indicadores de impacto para el agua, la tierra, las emisiones de GEI y el costo. *Revisiones de energía renovable y sostenible*, 171(113030), 113030. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.113030>
- Araújo, A. G., Pereira Carneiro, A. M., and Palha, R. P. (2020). Sustainable construction management: A systematic review of the literature with meta-analysis. *Journal of Cleaner Production*, 256(120350), 120350. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120350>
- Asnaashari, E. (2011). *A holistic conceptual model for managing construction logistics in building projects: the case of Iran*. <https://www.semanticscholar.org/paper/9d44652e9e00cf7f9f16d2589bde-13b7ff22e2fb>.
- Baduge, S. K., Thilakarathna, S., Perera, J. S., Arashpour, M., Sharafi, P., Teodosio, B., Shringi, A., and Mendis, P. (2022). Artificial intelligence and smart vision for building and construction 4.0: Machine and deep learning methods and applications. *Automation in Construction*, 141(104440), 104440. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104440>
- Braulio-Gonzalo, M., Jorge-Ortiz, A., and Bovea, MD (2022). ¿Cómo abordan los indicadores de los sistemas de clasificación de edificios ecológicos las dimensiones de la sostenibilidad y los marcos del ciclo de vida en los edificios residenciales? *Revisión de evaluación de impacto ambiental*, 95(106793), 106793. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2022.106793>
- Custodio, H. M., Hadjikakou, M., and Bryan, B. A. (2023). A review of socioeconomic indicators of sustainability and well-being building on the social foundation's framework. *Ecological Economics: The Journal of the International Society for Ecological Economics*, 203(107608), 107608. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2022.107608>
- Chen, T., Fu, M., Liu, R., Xu, X., Zhou, S., and Liu, B. (2019). How do project management competencies change within the project management career model in large Chinese construction companies? *International Journal of Project Management*, 37(3), 485–500. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2018.12.002>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (CEPAL). (2018). La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Una oportunidad para América Latina y el Caribe CEPAL. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/40155/24/S1801141_es.pdf.

Domínguez, E., Pérez, B., Rubio, Á. L., and Zapata, M. A. (2019). A taxonomy for key performance indicators management. *Computer Standards & Interfaces*, 64, 24–40. <https://doi.org/10.1016/j.csi.2018.12.001>

D'Inverno, G., Carosi, L., and Romano, G. (2021). Environmental sustainability and service quality beyond economic and financial indicators: A performance evaluation of Italian water utilities. *Socio-Economic Planning Sciences*, 75(100852), 100852. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2020.100852>

Faris, N., Lee, Y.-S., Meadows, M., Smeltzer, M., Ray, M., Ward, K., Fehnel, C., Houston-Harris, C., and Osarogiagbon, R. (2017). P1.01-021 The impact of smoking status on overall survival in a population-based non-small cell lung cancer (NSCLC) surgical resection cohort. *Journal of thoracic oncology: official publication of the International Association for the Study of Lung Cancer*, 12(1), S461. <https://doi.org/10.1016/j.jtho.2016.11.545>

Goel, A., Ganesh, L. S., and Kaur, A. (2019). Sustainability integration in the management of construction projects: A morphological analysis of over two decades' research literature. *Journal of Cleaner Production*, 236(117676), 117676. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117676>

Gholipour, H. F., Arjomandi, A., and Yam, S. (2022). Green property finance and CO₂ emissions in the building indus-

try. *Global Finance Journal*, 51(100696), 100696. <https://doi.org/10.1016/j.gfj.2021.100696>.

He, W., Liu, P., Lin, B., Zhou, H., and Chen, X. (2022). Green finance support for the development of green buildings in China: Effect, mechanism, and policy implications. *Energy Policy*, 165(112973), 112973. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.112973>

Hicks, B., Culley, S., Gopsill, J., and Snider, C. (2020). Managing complex engineering projects: What can we learn from the evolving digital footprint? *International Journal of Information Management*, 51(102016), 102016. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2019.10.001>

Kamari, A., and Kirkegaard. (2020). An integrated building design methodology based on systems thinking for reaching sustainability. *Education and Digital Theory-Ethics, Cybernetics, Feedback, Theory*, 1(38). [ecaade2020_036.pdf \(cumincad.org\)](https://cumincad.org/ecaade2020_036.pdf)

Kim, C.-J., Kim, J., Hong, T., Koo, C., Jeong, K., and Park, H. S. (2015). A program-level management system for the life cycle environmental and economic assessment of complex building projects. *Environmental impact assessment review*, 54, 9–21. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2015.04.005>

Lima, L., Trindade, E., Alencar, L., Alencar, M., and Silva, L. (2021). Sustainability in the construction industry: A systematic review of the literature. *Journal of Cleaner Production*, 289(125730),

125730. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125730>
- Maher, R., Maher, M., Mann, S., and McAlpine, C. A. (2018). Integrating design thinking with sustainability science: a Research through Design approach. *Sustainability Science*, 13(6), 1565–1587. <https://doi.org/10.1007/s11625-018-0618-6>
- Mahmoodi, E., Fathi, M., and Ghobakhloo, M. (2022). The impact of Industry 4.0 on bottleneck analysis in production and manufacturing: Current trends and future perspectives. *Computers & Industrial Engineering*, 174(108801), 108801. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108801>
- Mortaheb, M. M., and Mahpour, A. (2016). Integrated construction waste management, a holistic approach. *Scientia Iranica*, 23(5), 2044–2056. <https://doi.org/10.24200/sci.2016.2269>
- Okudan, O., Budayan, C., and Dikmen, I. (2021). A knowledge-based risk management tool for construction projects using case-based reasoning. *Expert Systems with Applications*, 173(114776), 114776. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.114776>
- Rajabi, S., El-Sayegh, S. y Romdhane, L. (2022). Identificación y evaluación de indicadores de desempeño de sustentabilidad para proyectos de construcción. *Indicadores ambientales y de sostenibilidad*, 15(100193), 100193. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2022.100193>
- Ruggerio, C. A. (2021). Sustainability and sustainable development: A review of principles and definitions. *The Science of the Total Environment*, 786(147481), 147481. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147481>
- Sala, J. M. P., and Picallo-Pérez, A. (2020). *Sustainability and exergy in buildings. An Exergy Analysis and Thermoconomics of Buildings* (pp. 791–843). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817611-5.00010-2>
- Santoli, L. (2019). From efficient to sustainable and zero energy consumption buildings (pp. 75–205). In *Handbook of Energy Efficiency in Buildings*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812817-6.00038-3>
- Sophie Wang, Q., Lai, S., Pi, S., and Anderson, H. (2022). Does directors' and officers' liability insurance induce empire building? Evidence from corporate labor investment. *Pacific-Basin Finance Journal*, 73(101753), 101753. <https://doi.org/10.1016/j.pacfin.2022.101753>
- Sharma, A. K. (2020). Evaluation of sustainability indicators of buildings. En *Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials* (pp. 87–91). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.10715-5>
- Shen, C., and Li, P. (2023). Social understanding of green building projects in China (2006–2022): Stakeholders, issue attention and divergences. *Environmental Impact Assessment Review*, 99(107004),

107004. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2022.107004>
- Shojaei, P., and Haeri, S. A. S. (2019). Development of supply chain risk management approaches for construction projects: A grounded theory approach. *Computers & Industrial Engineering*, 128, 837–850. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.11.045>
- Shi, Q., Cai, R., Huo, T., You, K., and Cai, W. (2023). A fairly and effective analysis for sharing CO₂ emissions reduction responsibility in China's provincial building sectors. *Environmental Impact Assessment Review*, 99(106984), 106984. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2022.106984>
- Silva, J. da, Fernandes, V., Limont, M., and Rauen, W. B. (2020). Sustainable development assessment from a capital's perspective: Analytical structure and indicator selection criteria. *Journal of Environmental Management*, 260(110147), 110147. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110147>
- Walker, NL, Williams, AP y Styles, D. (2020). Indicadores clave de rendimiento para explicar la eficiencia energética y económica en los servicios de agua, e identificar representantes adecuados. *Revista de Gestión Ambiental*, 269(110810), 110810. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110147>
- Yi, S. y Lim, SA (2021). Evaluación de la ecoeficiencia de las instalaciones de tratamiento de residuos en Corea. *Revis-*
ta de materiales peligrosos, 411(125040), 125040. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125040>
- Ordoñez, M. y Meneses, L. (2015). Criterios de sostenibilidad en el subsector vial. *Ciencia e Ingeniería Neognadina*, 25(2), 81 – 98. <https://doi.org/10.18359/rcin.1433>
- Sancho, G. García, E. y Rozo, E. (2017). Comparativa de indicadores de sostenibilidad para destinos desarrollados, desarrollo y con poblaciones vulnerables. *Annals of Tourism Research*, 9(1), 150-177. <https://www.uv.es/sancho/sostenibilidad%20destinospoblaciones%20vulnerables.pdf>
- Puentes-Ramírez, E., Hidalgo-Guerrero, A., Ortiz-Bernal, Y. y Betancourt-Quiroga, C. (2020). Indicadores de sostenibilidad social y su relación con el concepto de capital social. *Revista de Arquitectura*, 23(1), 97-104. <https://doi.org/10.14718/RevArq.2021.3072>
- García, S. y Guerrero, M. (2006) *Indicadores de sustentabilidad ambiental en la gestión de espacios verdes*. Parque urbano Monte Calvario, Tandil, Argentina. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022006000100004>
- Soria, J. y Valenzuela, L. (2015). dimensiones relevantes para la evaluación ambiental proactiva de la movilidad urbana. *Investigaciones Geográficas*, 87, 5-24. <https://doi.org/10.14350/rig.34416>
- Porras-Díaz, H., Sánchez-Rivera, O., Galvis-Guerra, J., Jaimez-Plata, N. y Cas-



tañeda-Parra, K. (2015). Tecnologías “Building Information Modeling” en la elaboración de presupuestos de construcción de estructuras en concreto

reforzado. *Entramado*, 11(1), 230-249.
<https://doi.org/10.18041/entramado.2015v11n1.21116>

Conflictos de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.



Licencia de Creative Commons

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



Fecha de recibido: 28-06-2023

Fecha de aceptado: 05-11-2023

DOI: 10.22490/21456453.6961

SYSTEM DYNAMICS AND VIABILITY THEORY FOR SUSTAINABILITY ASSESSMENT, APPLICATION FOR BIOETHANOL PRODUCTION IN COLOMBIA

DINÁMICA DE SISTEMAS Y TEORÍA DE LA VIABILIDAD PARA LA EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD, APLICACIÓN PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL EN COLOMBIA

Danny Ibarra Vega¹

Johan Manuel Redondo²

¹ Doctor of Engineering, Universidad de Antioquia, Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental, Medellín, Colombia. danny.ibarra@udea.edu.co

² Doctor of Engineering, Universidad de Rosario, Bogotá D.C., Colombia.
johan.redondo@urosario.edu.co

Citación: Ibarra-Vega, D. y Redondo, J.M. (2024). System Dynamics and Viability Theory for Sustainability assessment, application for bioethanol production in Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 15(2), 237-268.

<https://doi.org/10.22490/21456453.6961>

■ ABSTRACT

Contextualization: This paper has a framework for prospective assessment of sustainability in bioethanol in a dynamical way, this is important as a tool for policymakers in Colombia.

Knowledge gap: No dynamic models have been developed with the formulation of viable or desired scenarios. The evaluation of environmental aspects and sustainability is always carried out with past information and historical data, it is rarely carried out with prospective models and no restrictions or unwanted scenarios are linked. A general bioethanol supply chain must be modeled, connecting variables that represent sustainability indicators. The modeled indicators were proposed by the Global Bioenergy Partnership (GBEP).

Purpose: A model is built to evaluate sustainability indicators and know if the trend behavior of the system evolves through the desired regions that would correspond to the sustainability objectives and goals of the sector.

Methodology: A model is developed with System Dynamics and to integrate

the modeling with the evaluation of sustainability, the concept of constraints, developed in the Viability Theory, is used; Here, the desired regions of the system state are suggested and defined as desired, alert, and undesired scenarios.

Results and conclusions: The model have been tested with the information of a bioethanol production chain from sugarcane in Colombia with an installed capacity of 450 million liters per year, using two sustainability indicators that were designed and simulated using the constraint regions. These indicators are water consumption and jobs in bioethanol production. The results show important findings for modeling, monitoring, and assessing sustainability in the biofuels sector, using indicators and providing a method of implementing the best practices for sustainability using defined desired regions of the systems.

Keywords: Sustainability, Modeling, System Dynamics, Viability Theory, Bioethanol.

RESUMEN

Contextualización: en este artículo se desarrolló un marco referencial para la evaluación dinámica y prospectiva de la sostenibilidad del bioetanol de caña, como herramienta para los tomadores de decisiones en Colombia.

Vacío de conocimiento: no se han desarrollado modelos dinámicos con la formulación de escenarios viables o deseados. La evaluación de aspectos ambientales y sostenibilidad siempre se realiza con información pasada y datos históricos, pocas veces se hace con modelos prospectivos y no se vinculan restricciones o escenarios no deseados. Así, se debe modelar una cadena de suministro general de bioetanol, conectando variables que representen indicadores de sostenibilidad. Los indicadores modelados fueron propuestos por Global Bioenergy Partnership (GBEP).

Propósito: se construye un modelo para la evaluación de indicadores de sostenibilidad y saber si el comportamiento del sistema evoluciona por las regiones deseadas, que corresponderían a los objetivos del sector y metas de sostenibilidad.

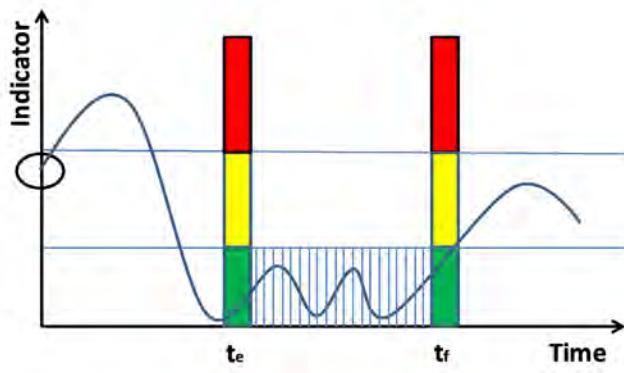
Metodología: se desarrolla un modelo con dinámica de sistemas y, para la in-

tegración de la modelación con la evaluación de la sostenibilidad, se utiliza el concepto de restricciones desarrollado en la teoría de la viabilidad; aquí las regiones deseadas del estado del sistema se sugieren y se definen como escenarios deseados, de alerta y no deseados.

Resultados y conclusiones: este modelo ha sido probado con la información de una cadena productiva de bioetanol a partir de caña de azúcar en Colombia con una capacidad instalada de 450 millones de litros al año, utilizando dos indicadores de sostenibilidad que fueron diseñados y simulados, junto con la evaluación de estrategias de mejora. Estos indicadores son el consumo de agua y el empleo en la producción de bioetanol. Los resultados muestran hallazgos importantes para modelar, monitorear y evaluar la sostenibilidad en el sector de los biocombustibles, utilizando indicadores y brindando un método para implementar las mejores prácticas para la sostenibilidad utilizando regiones deseadas definidas de los sistemas.

Palabras claves: bioetanol, dinámica de sistemas, modelamiento, sostenibilidad, teoría de viabilidad

■ GRAPHICAL ABSTRACT



Source: Authors.

Graphical abstract: Behavior of sustainability indicators in several regions in a prospective evaluation. The figure shows 3 scenarios: desired scenario in green, alert scenario in yellow, and undesired scenario in red. The figure shows the evolution of an indicator of sustainability from an initial condition in the alert scenario. Note that from some evaluation time until a final time , the indicator state is in the region of the desired scenario (hatched area)

1 INTRODUCTION

The application of sustainability measurement is currently an important topic in scientific community research and government programs in several countries in the world (Nabavi et al., 2017). The biofuels sector (Bioethanol, biodiesel, and Biogas) is one sector where sustainability is implemented and evaluated. Bioethanol is a biofuel produced from a biochemical process named fermentation of sugars, that sugars are obtained from crops or biomass of crops. It is a promising energy source because it has advantages over gasoline in terms of energy efficiency and emissions reduction. (Nigam and Singh,

2011; Zabed et al., 2017) Bioethanol production policies are currently focused on creating projects and sustainability standards, which is encouraging many countries to explore the use of biofuels in their energy systems. Biofuels have the potential to partially replace fossil fuels, reduce greenhouse gas emissions, increase the diversity of the energy mix, create jobs, and promote rural development. However, there are concerns about the potential environmental and economic impacts of biofuel production (Valencia and Cardona, 2014).

Bioethanol is the most technologically mature biofuel derived from microorganisms and a good candidate to replace fossil fuels (Zerva et al., 2014). Bioethanol is recognized as a promising energy source compared to gasoline because it has advantages in terms of energy efficiency and reduction of emissions. According to Nigam and Singh (2011), one liter of ethanol can contribute 66% of the energy provided by one liter of gasoline, but bioethanol has a higher-octane rating than gasoline. This improves the gas mileage when they are mixed in fuel for transportation. By blending bioethanol with gasoline, we can also oxygenate the fuel mixture so that it burns more completely and reduces polluting emissions (Zabed et al., 2017). That is why it is used as an additive in gasoline.

Biofuel production policies are currently focused on creating a production with sustainability standards. This is urging several nations to explore, implement, or consider the opportunity to introduce the production of biofuels from different feedstocks in their national energy systems (Pacini et al., 2013). "All of this is also encouraged because biofuels have been considered as an option for partially replacing fossil fuels" (Mata et al., 2013) and for reducing emissions of greenhouse gases, increasing the diversity of the energy mix, creating jobs, and promoting rural development (Scarlat and Dallemand, 2011). "However, concerns remain about the potential direct and indirect impacts for sustainable development, especially the contribution to greenhouse gases,

food safety, environmental effects, and economic development, which are still discussed in different contexts" (Valencia and Cardona, 2014).

Thus, the search for sustainable development as an adaptive process of learning by doing may be more comprehensible from the formulation and application of sustainability indicators (Dale et al. (2013); Pupphachai and Zuidema (2017); Evans et al. (2009)). Ahi and Searcy (2015) and Banos-González (2016) suggest that more research is needed to identify specific indicators that can be used to measure sustainability. In response to this need, sets of indicators have been developed to assess sustainability in biofuels production. One such set of indicators was proposed by the Global Bioenergy Partnership (GBEP) in 2011. This set consists of 24 indicators that can be used to assess and monitor bioenergy sustainability at the national level. "This was the first global consensus of governments to assess sustainability in the use of bioenergy through indicators. These indicators are based on the three pillars of sustainability: economic sustainability, social sustainability, and environmental sustainability". The GBEP indicators focus on the national and/or regional market level and consider biofuel throughout its lifecycle (Hayashi, Ierland, and Zhu, 2014). The use of these indicators provides a tool for generating and analyzing information. They are useful for sharing and comparing and for facilitating decision-making by different stakeholders in building sustainability policies in different contexts (Díaz-Chávez, 2011).

However, the assessment and monitoring of these indicators are done based on historical data and present and past behaviors. This is useful for learning the current states of the system but does not enable the visualization of the evolution of the system or its future behavior. Thus, this paper proposes an approach that strengthens current methods by including System Dynamics to better describe future states of a system through simulations and defining desired regions of sustainability.

In this line, a tool, a way or a method for modeling systems that allow the study of chance and necessity is required, as well as a method that shows emergent behaviors demonstrating the existence of adaptation. These concepts are developed in Viability Theory.

In Viability Theory, chance is a choice (ordinary differential equation) between the possibilities given by an evolutionary engine (differential inclusion) and necessity is a condition on the system states. In this way, each evolutionary path of the system (opportunity) represents an adaptation made by the system because of the environmental constraints (necessity). A change of a system is the same as the concept of chance in Viability Theory. Thus, aim objective of this study is to make an original contribution to the biofuels sector,

developing a tool that involves the ideas of chance, necessity, and adaptation, developed in the context of System Dynamics methodology and Viability Theory to prospectively evaluate the sustainability indicators established by the GBEP.

The proposal of this work for sustainability assessment in biofuel sector is presented with a specific example of bioethanol production from sugarcane in Colombia, where constraint conditions were defined for the state variables, giving, as result, delimited prospective regions (desired, undesired, and alert) that must be included for sustainability assessment in all contexts.

The paper is organized as follows: Section 1 presents the introduction with background information of the bioethanol sector in Colombia. Section 2 presents the methodology for the assessment of sustainability. Section 3 presents the results with a case study supply chain of bioethanol production from sugarcane in Colombia and the whole process of modeling, linking the GBEP indicators. After that, presents the results, discussion, and some suggestions for future work, and Section 4 presents the conclusions and directions for the modeling and assessment of sustainability indicators for biofuels.

MATERIALS AND METHODS 2

Supply chains are dynamic and complex, and modeling is an important tool for their analysis and design. System Dynamics is a modeling and simulation methodology used for dynamic problems. "It provides a set of conceptual and quantitative methods that can be used to represent, explore, and simulate the complex feedback and non-linear interactions among system elements" (Forrester (1961); Sterman (2000)). In System Dynamics, the main parts of a system are defined and represented as the causal interactions among attributes that describe it. A systemic representation is built, named a causal loop diagram. Consequently, a mathematical model and stock and flow diagram are then used for simulation purposes, followed by a testing phase (Ibarra and Redondo (2015); After the tests, it is possible to evaluate several prospective scenarios, making a variation of parameters, this can represent strategies or policies that can improve the behavior of the system based on the desired objectives. Ahmad et al. (2016).

System Dynamics is particularly useful for analyzing supply chains for biofuels such as sugarcane bioethanol due to their dynamic nature and complexity of production processes. It attempts to simulate the behavior of systems over time. This methodology can help in the analysis and problem solving of supply chain management (Tako and Robinson, 2012). Several studies have used System Dynamics to assess sustainability in different sectors, including the biofuels sector (Nabavi et al. (2017); Zhang et al. (2017); Dace et al. (2015)). Specifically in the biodiesel and bioethanol sector, it has also been used to obtain prospective scenarios for environmental and social impacts (Musango et al. (2012), Robalino-López et al. (2014), Demczuk and Padula (2017)).

After obtaining the model, it is necessary to determine whether the system evolves through desired states that correspond with the sustainability objectives of the sector. To achieve this, some basics of Viability Theory such as Chance, Necessity, and Adaptation have been linked.

The concept of Chance is included in this evaluation of sustainability indicators in the biofuel sector because production systems are constantly changing over time due to market dynamics and the energy transition policies. Therefore, changes in the production chain cannot be ignored when evaluating sustainability indicators.

The Necessity concept is included because any changes in the system may not necessarily meet the desired goals from different business model and sustainability trend. It is important that the state of the system meets certain restrictions to

ensure that business continuity and sustainability goals are achieved (Aubin, 1992).

The Adaptation concept is important in this context because the systemic constitution of any productive sector, including biofuels, occurs as an adaptive response of the sector to remain in the market. Adaptation is the direct response of the systems to the concepts of Chance and

Necessity (Aubin et al., 2011). Therefore, there is a need for a method of representing systems that would allow the study of Chance and Necessity and that would also show emergent behaviors demonstrating the existence of Adaptation.

The systematic organization of the methodological framework developed to evaluate sustainability indicators in the biofuel sector is described below in Figure 1.

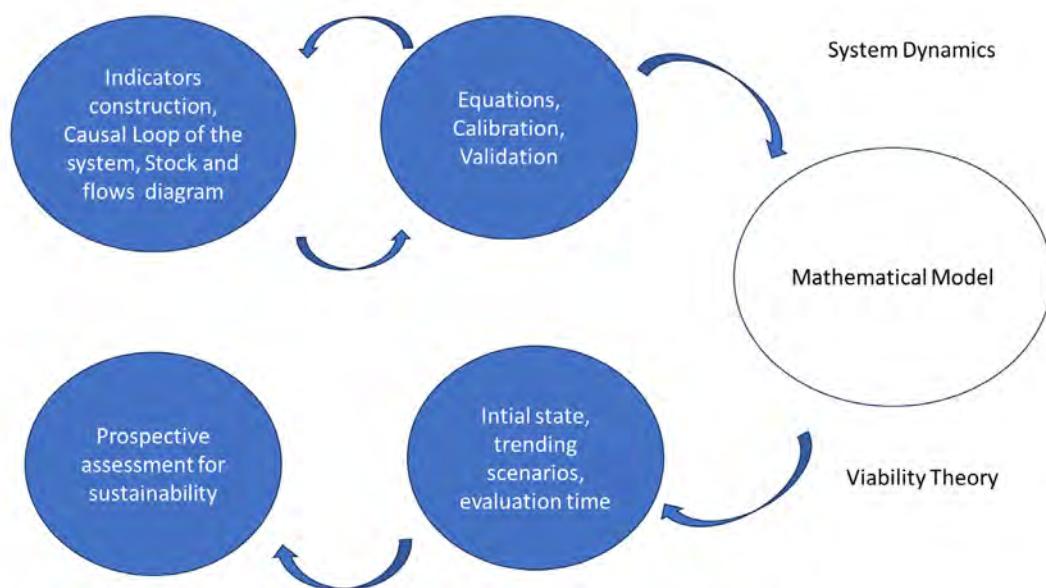


Figure 1. Framework for the assessment of sustainability in biofuels.
This propose was developed using system dynamics and viability theory

Source: Authors made from Sterman (2000); Walters et al. (2016); Ziemele et al. (2017); Ibarra-Vega (2017).

Modeling with System Dynamics

One of the methods commonly used for the representation of production systems is System Dynamics methodology (Ara-

cil and Gordillo, (1997); Sterman, (2000)). This systemic representation methodology is based on the establishment of causal relationships between attributes of the represented system, which will be considered as state variables, rates of change,

auxiliary variables, and parameters, resulting in a deterministic mathematical model of the system.

The first step is to model the system under study. Thus, we start by building a model of the biofuel supply chain to be evaluated. Specifically, as is widely known, System Dynamics consists of three main phases: conceptualization, formulation of the model, and model evaluation (Aracil and Gordillo (1997); Sterman, (2000)).

System Dynamics methodology is a commonly used method for representing production systems (Aracil and Gordillo, 1997; Sterman, 2000). This methodology is based on the establishment of causal relationships between attributes of the represented system, which will be considered as state variables, rates of change, auxiliary variables, and parameters, resulting in a deterministic mathematical model of the system. The first step in using this methodology is to model the system under study. Specifically, System Dynamics consists of three main phases: conceptualization, formulation of the model, and model evaluation (Aracil and Gordillo, 1997). In this case, we start by building a model of the biofuel supply chain to be evaluated.

The aim of the conceptualization phase is to understand and become immersed in the problem being studied. Here, we need to do what is usual in the scientific method, such as a review of the state of art. This allows a clearer view of what is to be modeled so that we can identify some parts of the system of interest and their interrelationships, which leads us to

build a dynamic hypothesis and a causal diagram with feedback structures.

Once the causal diagram is built, based on the attributes of interest identified in the system, we find the formulation phase, in which we can carry out a redrafting of this diagram in the formal language used in System Dynamics, which is the stock and flow diagram. With this diagram, the mathematical model representing the system is built. These equations can be introduced into simulation software, which in the case of this paper was Vensim Ple.

After programming the mathematical model in the simulation software, we proceed to make model runs, which, through graphic behavior of the variables, make it possible to see whether there is a consistent relationship between the dynamic hypothesis and the formulated model. This is done in order to know whether the model is potentially useful. Continuing with the evaluation, it is important to determine the sensitivity of the model in relation to its parameters.

Prospective evaluation and viability

The second step is to determine whether the system evolves through desired regions that correspond to the objectives of the sector and sustainability goals.

In this sense, the ideas of chance, necessity, and adaptation developed in the context of the methodology of System Dynamics and Viability Theory are involved.

From the systemic and mathematical representation achieved with System Dynamics methodology, we can perform different types of analysis of the orbits of the system. For example, a study of the invariant sets of the system and the changes that may occur in these sets when the parameters are varied could be performed, through applying the Theory of Nonlinear Dynamical Systems. But, the purpose of this paper is to determine how the orbits evolve in near time periods, that is, to study the transient behavior and to determine whether, when they evolve, they do so in the desired regions. To find out whether the system evolves through desired regions that correspond to the objectives of the sector and sustainability goals, Viability Theory (Aubin et al., 2011) has been used.

Viability Theory is used to design and develop mathematical and algorithmic methods to investigate the adaptation of the states of complex systems to their viable evolution sets (Aubin, 1992). The purpose of Viability Theory is to attempt to directly answer the question of dynamic adaptation of uncertain evolutionary systems to environments defined by constraints (Aubin et al., 2011).

Viability theory makes it possible to determine whether these thresholds (i.e., viability constraints) can be satisfied, and, if so, for what states of the system (Domech et al., 2014). These constraints can be named sustainability regions.

Thus, the methodology performed seeks to establish whether future states of the

productive system, that is, its indicators, are desired states. We call this: the prospective evaluation of sustainability indicators.

The development of the methodology proposed for carrying out the prospective evaluation of sustainability indicators begins with the presentation of the following elements:

- ❖ **Initial system state or baseline $x(t_0)$.** The initial state is the state that describes the first condition of the system. If x is the vector representing the system state for any time t then the initial state is represented as $x(t_0) \in \Omega \subset \mathbb{R}^n$, where Ω is the space of all possible states that could be adopted by the system.
- ❖ **Assessment time t_e .** This is the time when the evaluation of the system indicators will be done; thus, it is expected that if $t = t_0$ defines the time of the initial state of the system, the evaluation time $t_e \in \mathbb{R}_+$ will be greater than the time of the initial state, that is to say, $t_e > t_0$.
- ❖ **Trending scenarios A_i .** Trending scenarios A_i are partitions of the state of spaces of the form $A_i = \{x \in \mathbb{R}^n : a_i \leq x_i \leq b_i, i=1,\dots,n\}$ that satisfy two conditions: 1) the intersection of the scenarios must be empty ($A_i \cap A_j = \emptyset$) and 2) the union of the scenarios must be the space of possible states for the application ($\bigcup A_i = \mathbb{R}^n$).

For the assessment of sustainability in the biofuels sector, we have defined the following three scenarios:

1. Desired scenario A_D
2. Alert scenario A_A
3. Undesired scenario A_N

Therefore, the system has the desired values for the time of evaluation when for the time of evaluation and any future

value after it in a well-defined time interval, the system is in the region of the desired scenario ($t \in [t_e, t_f] x(t) \in A_D$), (Figure 2).

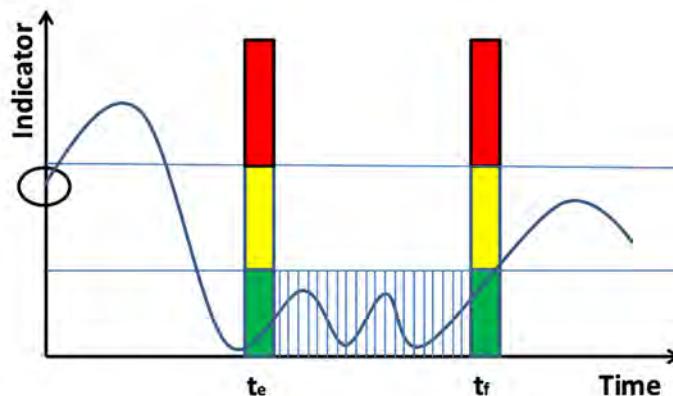


Figure 2. Prospective evaluation of sustainability indicators. The figure shows three scenarios: desired scenario in green, alert scenario in yellow, and undesired scenario in red. We also see the evolution of an indicator of sustainability from a certain initial condition in the alert scenario. Note that from some evaluation time t_e until a final time t_f , the indicator is in the region of the desired scenario (hatched area)

Source: Ibarra-Vega (2017).

Therefore, behaviors such as those presented in Figure 3 do not comply with the mentioned conditions because, although the system is in the region of the desired

scenario for one of the evaluation times, its later condition evolves in the region of other scenario; that is, $x(t_e) \in A_D$ but $x(t) \notin A_D, \forall t \in (t_e, t_f]$ (Figure 3).

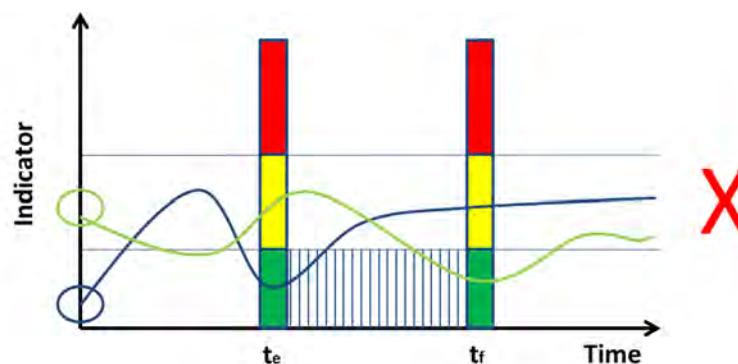


Figure 3. The orbit of the indicator reaches the desired scenario at the evaluation time but evolves into other scenarios

Source: Authors.

The purpose of the prospective evaluation is for the decision makers to know whether they will reach the goals set for the indicators or whether they should apply some types of actions that will allow them to achieve these goals and to experience these actions through simulation before implementing them.

Now, it may also occur that, $x(t_e) \neq Ad$, but for time values after the evaluation time, $x = Ad$. Then, what we can assume is that the evaluation time has been inadequately established or that the evaluation time is too early for the fulfillment of the goals to be reached.

Statistics analysis

For the simulation of the model and to generate real trend scenarios with behaviors that represent reality, statistical analyzes of behavior validation were carried out, for this, parameter values were obtained based on the existing information, in this way, the calculation of the parameters was carried out, associated with the growth of sugarcane cultivation and bioethanol production using multi-year growth averages.

$$\% Increase = \left(\frac{Final\ Value - Initial\ Value}{Initial\ Value} \right) * 100$$

And,

$$\% Increase\ prom = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$$

To review the trend behavior, the *MAPE*, the Average Absolute Percentage Error of three main variables of the bioethanol supply chain, was calculated. The formula used is the following:

$$MAPE = \frac{100\%}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{Real_i - Simulated\ i}{Real\ i} \right|$$

In System Dynamics, it is allowed to have MAPE of up to 15% depending on the object of the model. It should be noted that from the methodological point of view, these models are perceived as models of trend behavior and not predictive models. Once the bioethanol supply chain model has been simulated, it is necessary to carry out statistical tests for validation and to relate the dynamic hypothesis, the structure of the model, and its behavior (Cárdenas, 2015). In System Dynamics models, exist different validation criteria or techniques established by (Barlas, 1989) where, mainly, the validation of the structure and behavior is required.

To validate the behavior, the Monte Carlo method, also known as multiple probability simulation, was employed. In system dynamics, sensitivity analysis using Monte Carlo is a technique that allows us to assess how variations in model parameters influence the model's behavior. This is achieved by iteratively running the model with different randomly generated parameter values. This allows the modeler to see how the model's output varies over a range of possible parameter values. Section 3.1 presents the results of the statistical analyzes described here.

RESULTS AND DISCUSSION 3

RESULTS

For implementation of the proposed framework, a supply chain of bioethanol from sugarcane was modeled, as shown in the Figure 4.

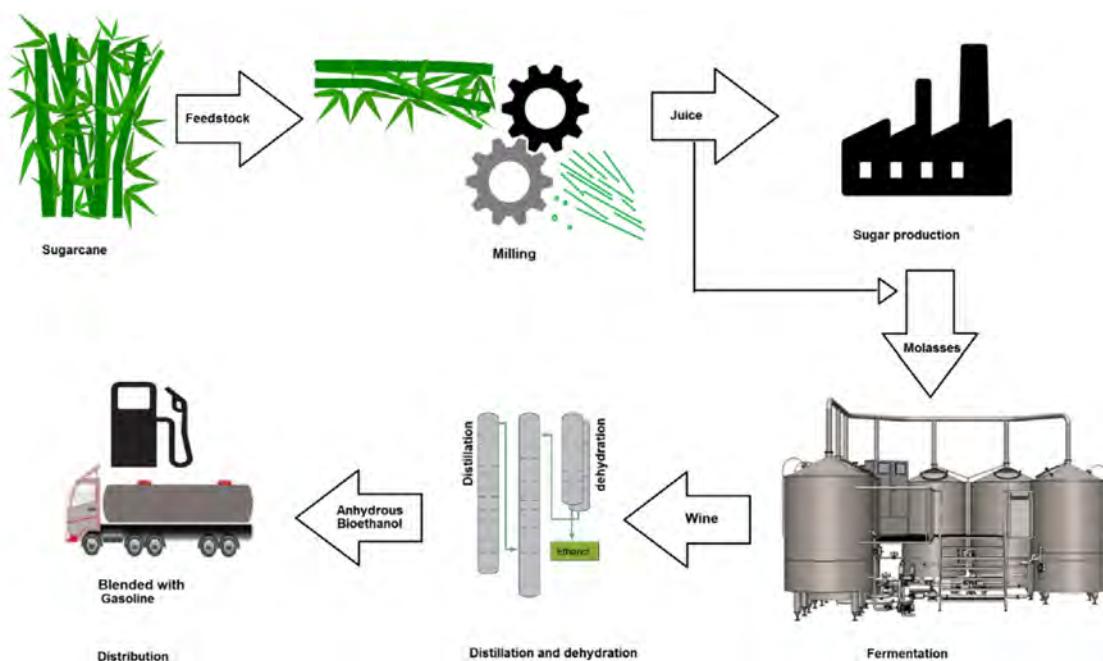


Figure 4. Limit of the supply chain of bioethanol used in this study

Source: Authors.

Description and modeling of the system

In Colombia, bioethanol is produced from sugarcane, due to the production of this type of plant is widely consolidated

in the country and this crop has higher energy efficiency compared to other raw materials from which bioethanol can be produced. In Colombia the crops of sugarcane take place mainly in the Cauca River Valley, in the departments of Valle, Cauca, Risaralda(CUE- Consortium, 2012).

For this paper, we took as base a bioethanol supply chain of sugarcane, presented in CUE- Consortium (2012) and Valencia and Cardona (2014). The main links in the chain of bioethanol are producing sugarcane (hectares of sugarcane), processing of raw materials, production, and transportation (Ibarra-Vega, 2016). Below the key attributes that were identified to obtain and define the system to be studied and that describe the parts of the supply chain of bioethanol are shown and defined.

- ❖ Sugarcane area: Refers to the total of hectares of sugarcane planted for the production of bioethanol.
- ❖ Net increase: Refers to the rate of increase in the value of hectares for sugarcane production.
- ❖ Harvested: Refers to the amount of hectares harvested that are conducted for the production of bioethanol.
- ❖ Preparation of sugarcane: Refers to the cleaning and grinding process of harvested sugarcane
- ❖ Installed capacity: Refers to the maximum production of bioethanol in liters, in the country.
- ❖ Sugarcane juice: Refers to the number of liters of sugarcane juice obtained for fermentation.
- ❖ Bioethanol production: Refers to the production process in function of production rate of fermentable juice and installed capacity

- ❖ Produced bioethanol: Refers to the accumulation of produced bioethanol, in liters
- ❖ Distribution: Refers to the total volume of bioethanol for blending with gasoline.
- ❖ Productivity: Refers to an indicator that shows the volume of bioethanol produced per hectare of sugarcane.

After identifying the main variables, of the sugarcane supply chain, it is possible create a basic causal diagram. Reinforcing loops are represented by the letter "R" and balancing loops are represented by the letter "B". There are four balancing loops (B1-B4) and two reinforcing loops (R1, R2). The causal loop diagram is the base to obtain the stock and flows diagram (Figure 6).

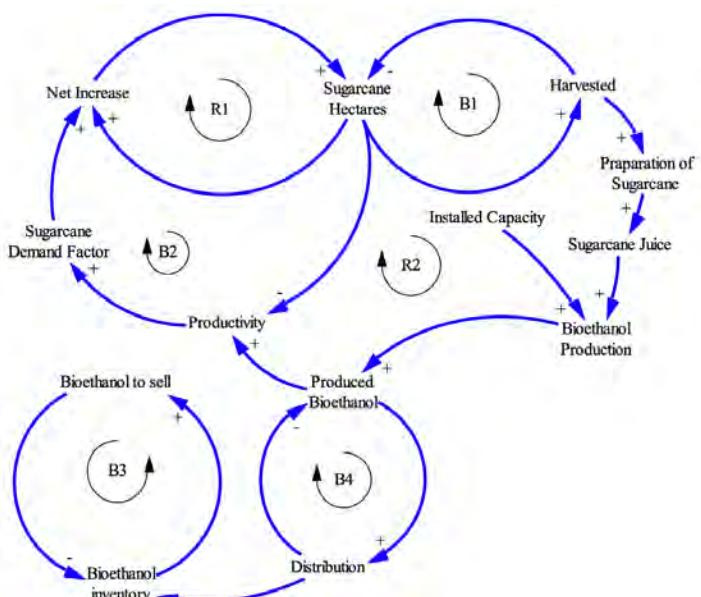


Figure 5. Causal loop diagram of the studied system of bioethanol

Source: Authors.

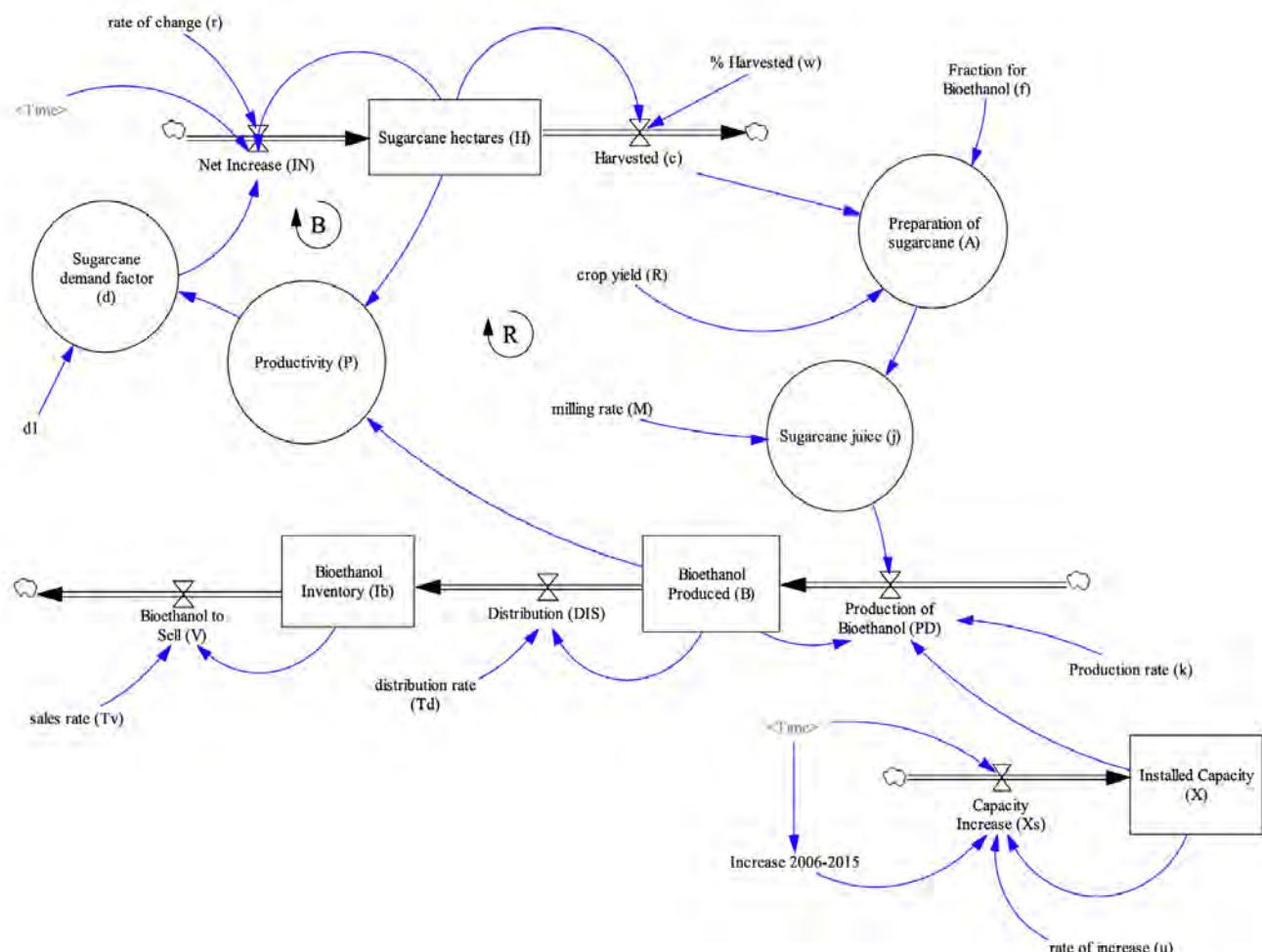


Figure 6. Stock and flows diagram of the studied system of bioethanol

Source: Authors.

From the stock and flow diagram the responding differential equations of the system are obtained, those represent the evolution in time of the state variables of the system (Sterman, 2000). Thus, it can say that the number of hectares of sugarcane planted is given by:

$$\frac{dH}{dt} = IN - C, \text{ (Equation 1)}$$

where IN is the net increase given by changing a demand factor, d , in relation to

the time and number of hectares of planted sugarcane and is defined by a piecewise function. r is a parameter to increase the number of hectares of sugarcane according to historical data from sugarcane crops in Colombia; this is related to the time steps t_i and t_j .

$$IN = \begin{cases} H + (H \cdot r) \text{ if } t < t_i \\ H + (H \cdot r) \cdot d \text{ if } t \geq t_j. \end{cases} \text{ (Equation 2)}$$

The harvested flow variable, C, is the number of hectares of sugarcane that are harvested per a fraction of the number of hectares, w. This is given by:

$$C = Ha \cdot w \quad (\text{Equation 3})$$

The flow variables IN and C are measured in hectares of sugarcane, ha.

The amount of bioethanol produced is estimated annually; it accumulates in bioethanol produced variable, B, which is given by the difference between the production of bioethanol, $\mathcal{P}\mathcal{D}$, and distribution, \mathcal{DIS} .

$$\frac{dB}{dt} = PD - DIS \quad (\text{Equation 4})$$

the production of bioethanol is modeled as a piecewise function:

$$PD = \begin{cases} x & \text{if } B \geq x \\ j \cdot k & \text{if } B < x \end{cases} \quad (\text{Equation 5})$$

In turn, the sugarcane juice j is defined by the product of the efficiency R and the auxiliary variable sugarcane preparation, A, which is a function of the crop yield, R, the milling rate, M, and the fraction for bioethanol, f, expressed as follows:

$$j = A \cdot M, \text{ where, } A = (R \cdot C) \cdot f \quad (\text{Equation 6})$$

k is the percentage production rate parameter. The installed capacity x in this model is represented by a capacity in-

crease as a Table function $f(x)$ and a rate of increase, u , as follows:

$$\frac{dx}{dt} = \{f(x), X \cdot u\} \quad (\text{Equation 7})$$

The variable flow distribution, DIS , is given by the product of bioethanol produced and a distribution rate, Td

$$DIS = B \cdot Td \quad (\text{Equation 8})$$

The amount of inventory of bioethanol, Ib , is represented by the difference between what is distributed, DIS , to stock and what is sold, V :

$$\frac{dIb}{dt} = DIS - V \quad (\text{Equation 9})$$

Sales relate to a constant sale rate Tv :

$$V = Ib/Tv \quad (\text{Equation 10})$$

To estimate the net increase, it is associated with a demand factor, d, which is modeled as a piecewise function of the productivity, P. A parameter threshold for increasing the demand factor is defined as n. In this way, the productivity P is defined by the amount of bioethanol produced B in the number of hectares of sugarcane aimed at production, ha, as follows:

$$P = B/H \quad (\text{Equation 11})$$

$$d = \begin{cases} d_1 & \text{if } P \geq n \\ d_2 & \text{if } P < n \end{cases} \quad (\text{Equation 12})$$

Statistics analysis and validation

For the validation of the structure, the estimation of the parameters began, with this, it seeks to justify the value of the parameters of the model with the historical information (Cárdenas, 2015), in this case, with the information of the actual production of bioethanol from sugarcane in Colombia. The parameters that were considered in the supply chain model are presented in Table 1. The estimation of the most important parameters, such as the net increase in sugarcane cultivation and the increase in bioethanol production, are

presented in Table 2 and Table 3. For the net increase of cane and the increase in installed capacity, the validation consisted mainly of finding the average values of annual production of bioethanol and the installed capacity from 2006 to 2015, based on this it was estimated the rate of net annual production increase of bioethanol and was included in the model. In Figure 7, a comparison of behaviour between bioethanol production historical data and simulation data is presented. Figure 8 shows the behavior validation correlation between the real values and the simulated values of the area planted with sugarcane.

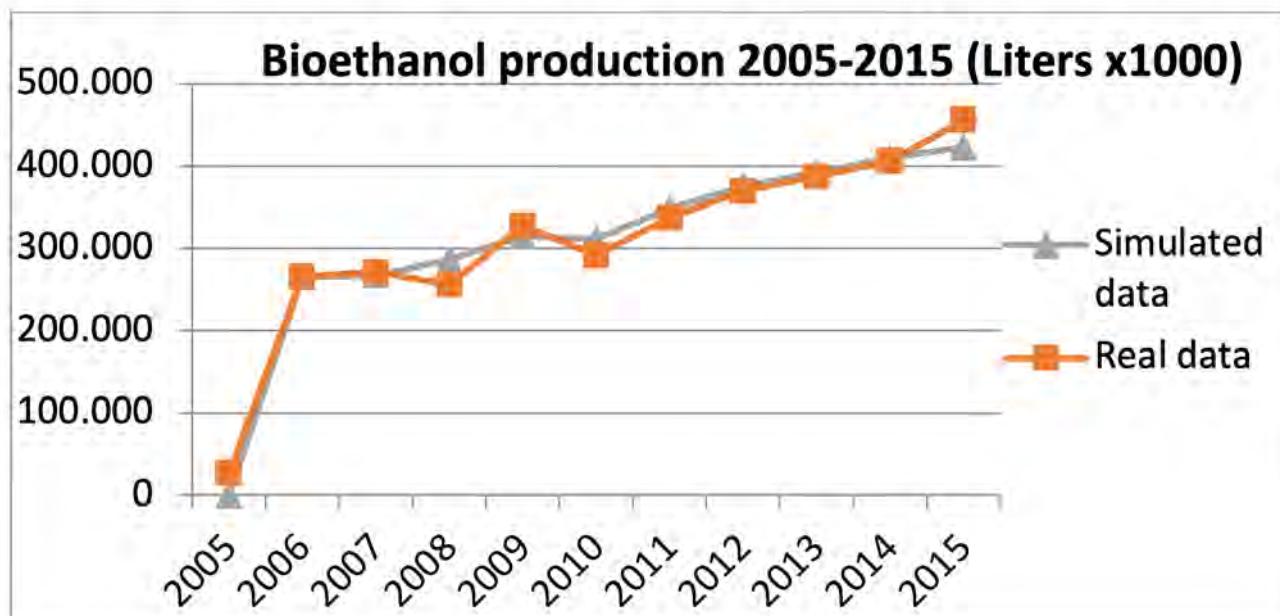


Figure 7. Comparison between bioethanol production historical data and simulation data

Source: Authors.

■ **Table 1.** Initial conditions

Parameter or initial condition	value	units	source
Harvest yield	118	Ton/Ha	CUE, 2012
Milling yield juice	70	Liters/Ton	CUE, 2012
Net increase of sugarcane area	Prom of 2006-2015	Percentaje	Asocaña, 2016
Increase capacity	Prom estimated 2006-2015	Percentaje	Asocaña, 2016
sugarcane area (Net)	203.184	Ha	Asocaña, 2012
Bioethanol produced	265.684	Thousands of liters	FedeBiocombustibles, 2015

Source: Ibarra-Vega (2016; 2017); CUE- Consortium (2012).

■ **Table 2.** Estimated rate of increase in sugarcane cultivation

Year	Net area planted National (hectares)	Net Increase (Calculated)
2006	203.184	NA
2007	202.926	-0,1270
2008	205.664	1,3493
2009	208.254	1,2593
2010	218.311	4,8292
2011	223.905	2,5624
2012	227.748	1,7164
2013	225.560	-0,9607
2014	230.303	2,1028
2015	232.070	0,7673
	Average	1,499

Source: Authors.

■ Table 3. Estimate of rate of increase in Bioethanol Production

Year	Production (Thousands of liters).	Production (Simulation)	Net increase (%)
2006	265.684	146.000	NA
2007	271.773	284.223	2,29
2008	255.584	304.196	-5,96
2009	327.705	322.045	28,22
2010	291.286	343.088	-11,11
2011	337.398	362.915	15,83
2012	369.722	385.776	9,58
2013	387.859	409.477	4,91
2014	406.468	431.624	4,80
2015	456.403	444.329	12,29
		Increase average	6,760

Source: Authors.

■ Table 4. Milled sugar cane and Hectares of planted sugar cane

Year	Milled sugarcane (Tons)	Milled sugarcane (Tons) (Simulation)	Net area planted National (hectares)	Net area planted National (hect- ares) (Simulation)
2006	22.019.933	21.907.400	203.184	203.184
2007	21.090.203	22.250.100	202.926	206.297
2008	19.207.728	22.587.400	205.664	209.424
2009	23.588.646	22.929.800	208.254	212.599
2010	20.272.594	23.277.400	218.311	215.822
2011	22.728.758	23.630.300	223.905	219.094
2012	20.823.629	23.988.600	227.748	222.416
2013	21.568.243	24.352.200	225.560	225.788
2014	24.283.248	24.721.400	230.303	229.211
2015	24.205.089	25.096.200	232.070	232.685

Source: Authors.

As a complement to the validation of the behavior, the calculation of the Average Absolute Percentage Error (MAPE) was used, which calculates the accuracy of the model trend, defining a MAPE up to 30% as valid (Barlas, 1989, Bautista, 2016). The MAPE synthesis is presented in table 5,

was calculated using the information presented in table 4, for Milled Cane, Planted Cane Area, and Produced Bioethanol (The most important for the supply chain), the values generated by the model were compared with the historical values collected between 2006 and 2015.

Table 5. MAPE simulation of three main variables

Variable	MAPE 2006-2015 %
Ground cane	7.217
Net area planted National	0,016
Bioethanol Produced	6,742

Source: Authors.

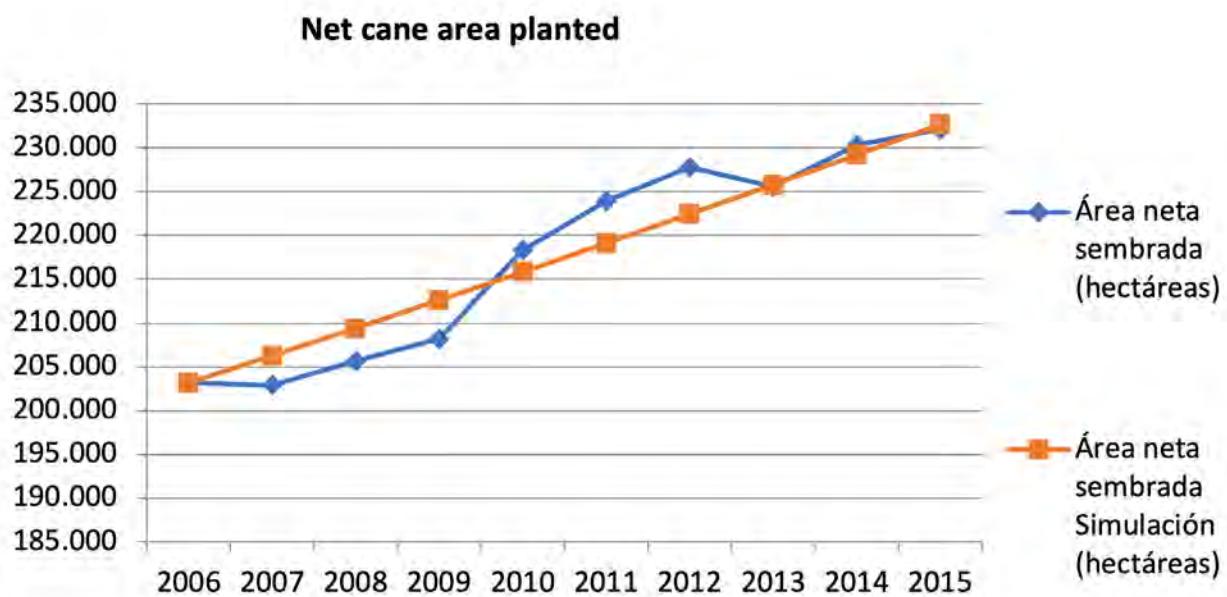


Figure 8. Comparison between historical data of sugarcane hectares and simulation data

Source: Authors.

Sensitive analysis with Montecarlo in Vensim

Sensitivity analysis is a technique used to assess how the uncertainty in the output of a model or system can be divided and allocated to different sources of uncertainty in its inputs. It is a what-if analysis that helps you understand how changes in the input variables of a model will affect the output.

The results of the numerical sensitivity analysis that were performed on the initial model are shown below. Numerical sensitivity exists when changes in the assumptions change the numerical results

(Valencia, 2017). This test was performed using Vensim Plus software. This software can do repeated simulations in which the selected model parameters are modified, for each simulation. This can be very useful for understanding the behavior limits of a model. For the variables Produced Bioethanol, Sugarcane area planted, and productivity, it is possible to see the evolution with modifications in the demand growth rate (d_1) with values (0.4 to 1.05), the initial value of the demand is 1. The behavior of the variables shows a possible reduction of up to 60% and a slight increase, above the current demand. This allows us to see the great sensitivity that the model must market demand.

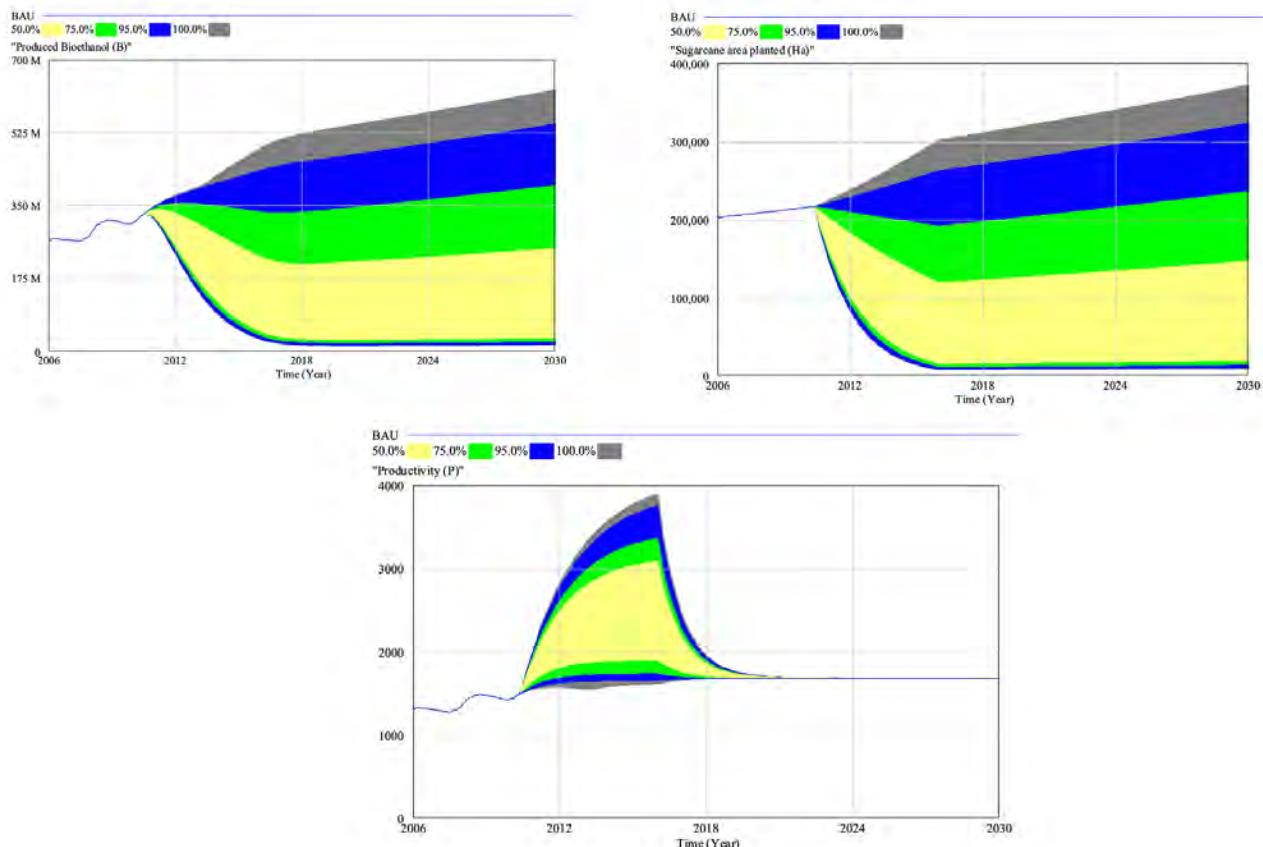


Figure 9. Numerical sensitivity analysis, Montecarlo method with Vensim, for three variables

Source: Authors.

Indicators

Once the mathematical model of the supply chain has been defined and validated, we proceed to link the social and environmental variables, considering the causal diagram constructed (Figure 5). Thus, a connection to environmental and social indicators generated from the supply chain is displayed.

For this paper, two indicators were chosen from those proposed by GBEP (2011): one from the environmental pillar and the other from the social pillar. The environmental indicator is water consumption, and the social indicator is jobs in the whole of the supply chain. Later, the indicators must be represented in a stock and flow diagram to obtain the equations representing the temporal evolution.

Once the model of the bioethanol production chain has been built, we proceed to model the indicators to be evaluated. When modeling these indicators, we considered the information of a production chain of 450 million liters of bioethanol per year in Colombia.

Use and water efficiency indicator

This indicator can measure the volume of water withdrawn from a watershed for the production and processing of bio-energy feedstocks per unit of bioenergy output (GBEP, 2011). In this case, the indicator was modeled considering the estimated water consumption for growing sugarcane intended to produce bioethanol. The amount of water consumed is a function of the number of hectares of sugarcane planted.

The stock and flow diagram in Figure 9 complements the one in Figure 6. It shows the dynamics of the water consumption indicator. The stock represents the amount of water consumed, and the flow represents the rate at which water is consumed. The rate of water consumption is a function of the number of hectares of sugarcane planted.

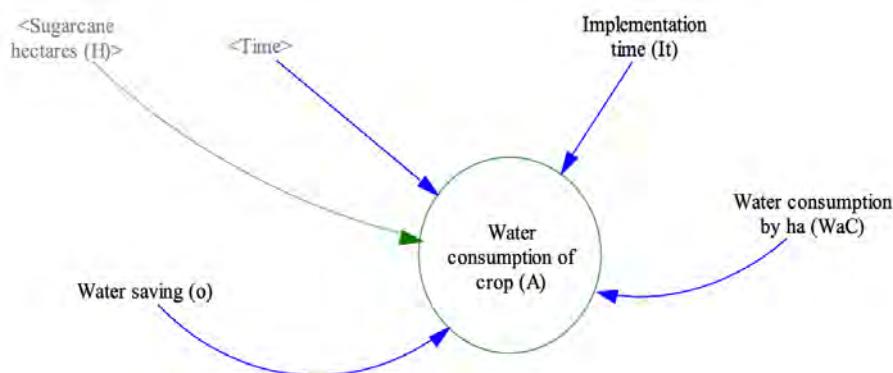


Figure 9. Water indicator int the stock and flow diagram

Source: Authors.

The initial conditions defined for the simulation of the model with the indicator of water consumption are presented in the Table 6.

The simulation model shows that the annual water consumption variable without any intervention is in the undesired scenario in 2020. This is because the amount of water consumed is not with-

in the desired range of 1.25 billion cubic meters. Therefore, a strategy or policy is needed to move the indicator state to the desired region. We implemented water saving strategies for sugarcane cultivation, which is the activity with the highest water consumption. These strategies seek savings of 20%, 30%, and 60% in water consumption, with the combination of improved irrigation techniques.

Table 6. Water saving techniques

Saving strategy	Technical description of savings	Irrigation per hectare per year	Percentage savings
NA	BAU (Business As Usual)	9000 m ³	NA
Savings 1	ACI (Administrative Control of Irrigation)	7200 m ³	20
Savings 2	ACI and alternating groove	6300 m ³	30
Savings 3	ACI, alternating groove, and pipe with gate	3600 m ³	60

Source: CUE- Consortium (2012).

The assessment of the water consumption indicator (Annual behavior) reveals that implementing savings strategies would enhance the situation and steer the system towards the desired area. However, this improvement is only observed

in the system that incorporates savings strategies 2 and 3 (refer to Figure 10). As a result of its temporal evolution, it is in the region of the desired scenario at $t_e = 2020$ and $t_f = 2025$, satisfying the proposal of this paper.

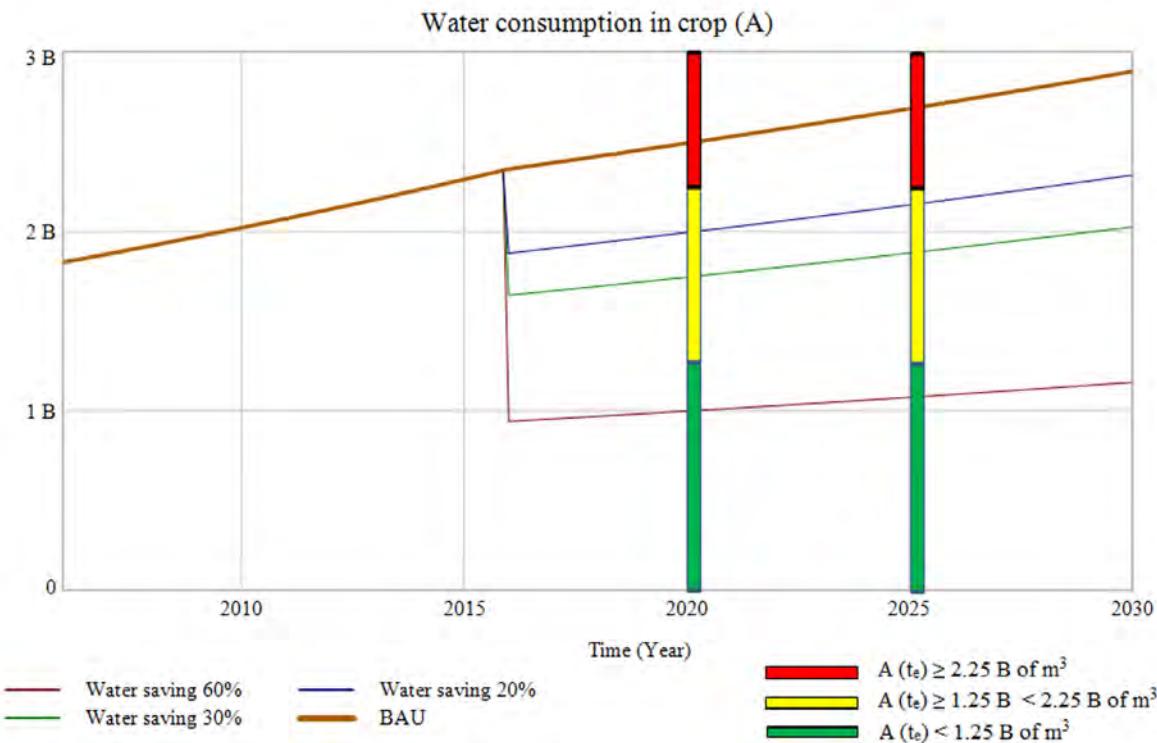


Figure 10. Prospective behavior for assessment water consumption (A) with water savings strategies

Source: Authors.

Employment generation indicator

This indicator is defined by GBEP as net job creation because of the production and use of bioenergy. We used this employment indicator in this paper, measuring it as the number of jobs generated throughout the production chain of bioethanol presented in figures 5 and 6.

The GBEP defines this indicator as the net number of jobs created due to the production and use of bioenergy. In this paper, we used this employment indicator to measure the number of jobs generated throughout the production chain of bioethanol. The causal diagram in Figure (11a) shows the link between the indicator of the number of jobs and the other variables in the model. The stock and flow diagram in Figure (11b) can model the indicator itself.

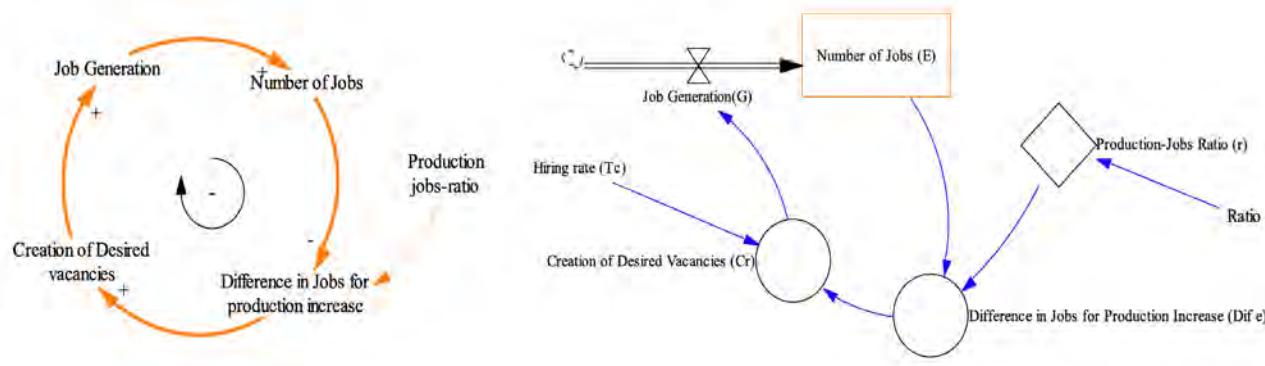


Figure 11. (a) Causal diagram of jobs indicator; (b) Stock and flow diagram of the job's indicator

Source: Authors.

The initial parameters and conditions to simulate the model are the same that were presented in Table 1. For every 300 million liters of bioethanol produced annually, there is an employment relationship of 60,000 jobs.

The evaluation results of the job indicator, without intervention of government policies, indicate that the suggested initial conditions and with the scaled-up production of bioethanol, there will be a decrease in the number of jobs. This decline leads to the undesired region (Red) by $t_e = 2020$ in the temporal progression. Consequently, it becomes crucial for the government to implement sectoral policies aimed at increasing job opportunities in bioethanol production. Additionally, monitoring the correlation between ethanol production or production growth and the generation of new jobs is essential to achieve social benefits.

Therefore, these results of the jobs indicator indicate an improvement in the time evolution of the indicator, given by the implementation of a policy that seeks to increase the number of jobs by 10 and 50% and to decrease the number of jobs by 20% at $t_e = 2025$ in the model. The desired scenario was defined as the existence of more than 120,000 jobs.

Figure 12 shows the evaluation with three different policies affecting the employment rate. Policies in E1 and E2 are proposed by the national government. It is concluded that the implementation of policies to increase employment by 60% (E2) would improve the outlook and bring the system within the desired region, because its evolution is within the region of the desired scenario at $t_e = 2020$ and $t_e \geq t_e$

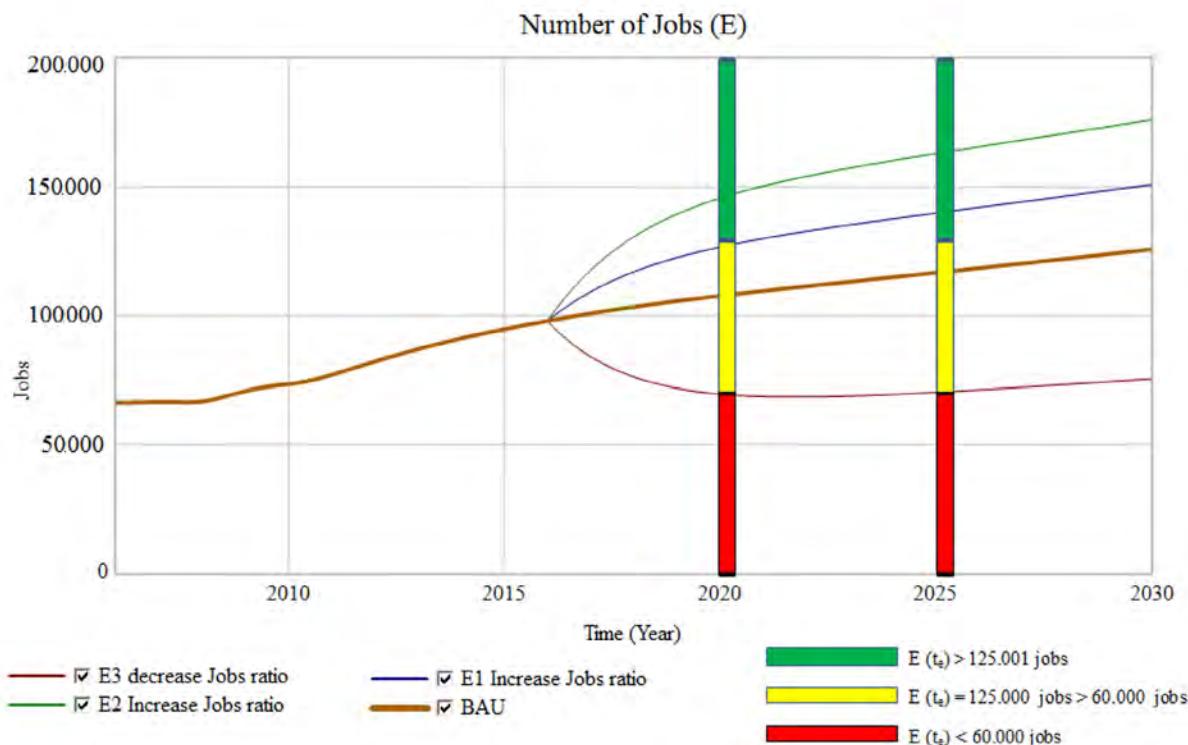


Figure 12. Prospective evaluation of number of jobs

Source: Authors.

DISCUSSION

This study created and verified the structure of a generic framework for assessing sustainability in biofuels using System Dynamics and Viability Theory. The model represents change over time through differential inclusion generated by System Dynamics modeling. The framework defines prospective regions (desired, undesired, and alert) based on constraint conditions defined on the indicators. Objective regions for the evolution of the system's states are defined as necessary. Adaptation refers to changes or parameter arrangements that repre-

sent decision rules for the system to define which satisfy viable constraints for an evaluation time interval. This perspective of Viability Theory inspires the methodology for sustainability assessment. The desired region is the same concept as the viable region.

This proposal for evaluating viable regions or the sustainability of the studied system is a good approximation under the conditions where the structure of a system intended for evaluation is known or clearly defined. The goal is that once the system is modeled, it can be identified the system's indicators or variables repre-

sent sustainability measures, allowing us to technically and prospectively define desired, alert, or undesired regions. Therefore, the initial step is to build the model that represents the problem or system under study. Without this preliminary step, the methodology proposed in this article would be restricted by lacking an adequate prospective representation.

The proposed approach can also be used as the basis for other studies of other biofuel production processes, since the integration of System Dynamics methodology and the concepts of Viability Theory performed in this paper seek to establish whether the future states of any productive system, that is, its sustainability indicators, are in the desired states. These desired states must be defined as trending scenarios of the behavior and evolution of each indicator that is going to be evaluated. Desired states should be obtained for each biofuel production assessment context, including the raw material, production scale, and supply limits. These results constitute an important level of novelty

within the ongoing debate on sustainability assessment.

This paper proposes that when carrying out the prospective evaluation of sustainability indicators in biofuels production, it is necessary to consider the following general elements: the initial system state or baseline $x(t_0)$, the evaluation time t_e , and the trending scenarios A_i .

The authors have identified possible trends for further research. New considerations should be addressed to the following areas:

- ❖ Modeling additional sustainable indicators in order to increase the impact of this framework;
- ❖ Adding some policy measures;
- ❖ Including criteria to define the evaluation time;
- ❖ An accurate validation based on the structure of the system to be evaluated, historical data, and sensitivity analysis.

CONCLUSIONS 4

This paper presents a framework for sustainability-assessment indicators in the biofuel sector. The methodology involves the ideas of chance, necessity, and adaptation developed in the context of the Theory of Viability. These ideas were represented within a theoretical sugarca-

ne bioethanol supply chain with an installed capacity of 450 million liters per year based on the methodology of System Dynamics.

This paper uses a qualitative approach to demonstrate that System Dynamics

methodology can be used to represent the sugarcane bioethanol production sector or other biofuels from other sectors in Latin America and the world. The constraints, desired regions, and evaluation times of the indicators depend on the behavior of each biofuel market and on the local economy where this framework can be implemented.

The methodology developed in this research for sugarcane bioethanol in Colombia can evidence that it can be used to evaluate the future sustainability of the bioethanol and other biofuel production system. To do this, the production chain must be modeled by defining the raw material, installed production capacity, and annual increase in biofuel production. Sustainability indicators are also chosen and modeled for evaluation. After building the model, it is necessary to determine whether the system evolves through the desired regions by increasing the evaluation times and interval values according to the policies and interests of the context in which it is developed.

In the development of the research, it was possible to model and mathematically express biofuel sustainability indicators proposed by GBEP in a dynamic way, the indicators used show that it is possible to formulate dynamic indicators to carry out prospective evaluations and not static ones as they are normally formulated.

The production of biofuels is expected to increase and become a substantial part of the diversification of energy sources in Colombia, however, it is necessary to evaluate the sustainability of each market in order to explore its effects in different dimensions such as economic, social, and environmental. A framework can be used as a high-impact tool for assessing sustainability in present states and future states in economies with bioenergy production with different raw materials.

Our successful application demonstrates the framework potential to guide decision-making on biofuel development and ensure a balanced approach that prioritizes both energy security and food security. Future research could explore its applicability to other biofuels and further refine the indicators for tailored assessments.

The competition between sugarcane for ethanol production and crops for food requires clear and sustainable agricultural policies, particularly regarding water and soil nutrient consumption. Increased sugarcane planting can impact food security, especially in resource-limited areas. Therefore, we need models to find a balance between biofuel production and food production, thus ensuring a sustainable future where both energy and food needs are met for generations to come.

CONTRIBUCIÓN DE LA AUTORÍA ■

Danny Ibarra Vega: Research methodology, model formulation, model development, project administration, simulation, validation, manuscript draft, review and editing

Johan Manuel Redondo: Research methodology, model formulation, Viability Theory advisor.

ACKNOWLEDGMENTS ■

To the National University of Colombia, Manizales, for providing workspace and support in the development of this project. We would also like to thank the doc-

toral program in Engineering, automatic line; to Asocaña for making information available.

REFERENCES ■

Ahmad, S., Tahar, F., Muhammad-Sukki, A.B. and Munir, R.A. (2016). Application of system dynamics approach in electricity sector modelling: a review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 56, 29–37. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.034>

Ahi, P., and Searcy, C. (2015) Assessing sustainability in the supply chain: A triple bottom line Approach. *Applied Mathematical Modelling*, 39, 2882–2896. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2014.10.055>

Aracil, J. and Gordillo, F. (1997). *System Dynamics*. Madrid. Alianza Editorial.

Aubin, J. (1992). *Viability Theory*. Birkhäuser.

Aubin, J., Bayen, J.P., and Saint-Pierre, P. (2011). *Viability Theory*. Springer-Verlag. 10.1007/978-3-642-16684-6 2

Banos-González, I., Martínez-Fernández, J., and Esteve-Selma, M. (2016). Dynamic integration of sustainability indicators in insular socio-ecological systems. *Ecological Indicators*, 67, 565–

576. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.03.021>
- CUE-Consortium. (2012). *LCA- Environmental Impact. Study- Evaluation of the life cycle of the biofuel production chain in Colombia*. Inter-American Development Bank-IDB; Ministry of Mines and Energy.
- Dace, E., Muizniecea, I., Blumbergaa, A., and Kaczala F. (2015). Searching for solutions to mitigate greenhouse gas emissions by agricultural policy decisions. Application of system dynamics modeling for the case of Latvia. *Science of the Total Environment*, 527–528, 80–90. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.04.088>
- Dale, V.H., Efroymson, R., Kline, K., Langholtz, M., Leiby, P., Oladosu G., Davis, M., Downing, and Hilliard, M. (2013). Indicators for assessing socioeconomic sustainability of bioenergy systems: A short list of practical measures. *Ecological Indicators*, 26, 87–102. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.10.014>
- Demczuk, A., and Padula, A.D. (2017). Using system dynamics modeling to evaluate the feasibility of ethanol supply chain in Brazil: The role of sugarcane yield, gasoline prices and sales tax rates. *Biomass and Bioenergy*, 97, 186-211 <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.12.021>
- Díaz-Chávez, R. A. (2011). Assessing biofuels: Aiming for sustainable development or complying with the market? *Energy Policy*, 39, 5763–5769. doi:[10.1016/j.enpol.2011.03.054](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.03.054)
- Domenech, A., P., Saint-Pierre, P., Fanokoa, P.S. and Zaccour, G. (2014). Sustainability of the dry forest in Androy: A viability analysis. *Ecological Economics*, 104, 33–49. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2014.04.016>
- Elsawah, S., Pierce, S.A., Hamilton, S.H., van Delden, H., and Jakeman, A.J. (2017). An overview of the system dynamics processes for integrated modelling of socio-ecological systems: Lessons on good modelling practice from five case studies. *Environmental Modelling and Software*, 93, 127-145. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.03.001>
- Evans A., Strezov V., and Evans TJ. (2009). Assessment of sustainability indicators for renewable energy technologies. *Renewable Sustainable Energy Review*, 13, 1082–8. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2008.03.008>
- Forrester, J. (1961). *Industrial Dynamics*. Pegasus Communications, Waltham.
- Global Bioenergy Partnership-GBEP (2011). *The global bioenergy partnership sustainability indicators for bioenergy*. Global Bioenergy Partnership.
- Hayashi T., Ierland E., and Zhu, X. (2014) A holistic sustainability assessment tool for bioenergy using the Global Bioenergy Partnership (GBEP) sustainability indicators. *Biomass and Bioenergy*, 6(6), 70-80. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.01.040>

- Ibarra-Vega, D. (2016). Modeling Waste Management in Bioethanol Supply Chain: A system dynamics Approach. *DYNA*, 83(195). <http://dx.doi.org/10.15446/dyna.v83n195.47514>
- Ibarra, D. (2017). Modelado para la evaluación de sostenibilidad en la cadena de suministro de bioetanol. [Tesis Doctorado, Doctorado en Ingeniería Automática]. Universidad Nacional de Colombia.
- Ibarra, D., and Redondo, J.M. (2015). System Dynamics, a tool for environmental education in engineering. *Journal Luna Azul*, 41, 152-164. <https://doi.org/10.17151/luaz.2015.41.9>
- Nabavi, E., Daniell, K., and Najafi, H. (2017). Boundary matters: the potential of system dynamics to support sustainability? *Journal of Cleaner Production*, 140, 312-323. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.032>
- Nigam P.S, and Singh A. (2011). Production of liquid biofuels from renewable resources. *Progress in Energy Combustion Sciences*, 37(1), 52–68. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2010.01.003>
- Pacini, H., Assuncao, L., Dam, J.V., Toney jr, R. (2013). The Price for biofuels sustainability. *Energy Policy*, 59, pg 898-903. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.03.042>
- Pupphachai, U., and Zuidema, C., (2017). Sustainability indicators: A tool to generate learning and adaptation in sustainable urban development. *Ecological Indicators*, 72, 784–793. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.09.016>
- Ribalino-López, A., Mena-Nieto, A., and García-Ramos J.E.(2014) System dynamics modeling for renewable energy and CO₂ emissions: A case study of Ecuador. *Energy for Sustainable Development*, 20, 11–20 <http://dx.doi.org/10.1016/j.esd.2014.02.001>
- Scarlat N., and Dallemand J.F. (2011). Recent developments of biofuels/bioenergy sustainability certification: a global overview. *Energy Policy*, 39(3), 1630-46. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.12.039>
- Sterman, J. (2000). *Business Dynamics*. McGraw-Hill.
- Tako, A., and Robinson, S. (2012). The Application of Discrete Event Simulation and System Dynamics in the Logistics and Supply Chain Context. *Decision Support Systems*, 52(4), 802-815.<https://doi.org/10.1016/j.dss.2011.11.015>
- Valencia, M., and Cardona, C.A. (2014). The Colombian biofuel supply chains: The assessment of current and promising scenarios based on environmental goals. *Energy Policy*, 67, 232-242.<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.12.021>
- Walters, J.P., Archer, D.W., Sassenrath, G.W., Hendrickson, J.R., Hansond, J.D., Halloran, J.M., Vadas, P., and Alarcon, V.J. (2016). Exploring agricultural production systems and their fundamental components with system dynamics modelling. *Ecological Modelling*,

333, 51–65. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2016.04.015>

Zhang, Y., Zhao, T., Zhang, Z., Wan J., Feng X., Liang, X., Zhou, A. (2017). Modeling and dynamic assessment on sustainable development of drainage enterprise: Application of a coupled system dynamics comprehensive assessment model. *Journal of Cleaner Production*, 141, 157-167. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.055>

Zabed, H. Sahu, J.N., Suely, A., Boyce, A.N., Faruq, G. (2017). Bioethanol production from renewable sources: Current perspectives and technological progress. *Renewable and Sustainable*

Energy Reviews, 71, 475–501. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.076>

Zerva, A., Savvides, A.L., Katsifas, E.A., Karagouni, A., and Hatzinikolaou D. (2014). Evaluation of Paecilomyces variotii potential in bioethanol production from lignocellulose through consolidated bioprocessing. *Bioresource Technology*, 162, 294–299.

Ziemele, J., Gravelsins, A., Blumberga, A., G. Vigants, and D. Blumberga. (2016). System dynamics model analysis of pathway to 4th generation district heating in Latvia. *Energy*, 110, 85–194. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.11.073>

Conflictos de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.



Licencia de Creative Commons

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



Fecha de recibido: 14-07-2023

Fecha de aceptado: 30-11-2023

DOI: 10.22490/21456453.7003

ESTIMACIÓN DE ANALITOS DEL SUELO EN LA ALTILLANURA, CON TELEDETECCIÓN SENTINEL-2 Y MODELOS DE REGRESIÓN

ESTIMATION OF SOIL ANALYTES IN THE PLATEAU, WITH SENTINEL-2 REMOTE SENSING AND REGRESSION MODELS

Andrés Felipe Gómez Chávez¹

Jeimy Katherin Feo Mahecha²

Sergio David Parra González³

¹ Ingeniero Agrónomo. andres.gomez.chavez@unillanos.edu.co

² Magíster en Sistemas de Información Geográfica. jeimy.feo-mahecha@stud.sbg.ac.at

³ Magíster en Ciencia en Suelo, Universidad de los Llanos, Grupo de Investigación

Innovación en Sistemas Agrícolas y Forestales ISAF, Villavicencio, Colombia.

sdparra@unillanos.edu.co

Citación: Gómez, A., Feo, J. y Parra, S. (2024). Estimación de analitos del suelo en la altillanura, con teledetcción Sentinel-2 y modelos de regresión. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 15(2), 269-289. <https://doi.org/10.22490/21456453.7003>

■ RESUMEN

Contextualización: la incorporación de nuevas técnicas y tecnologías para conocer la composición y las características de los suelos usados en la producción agrícola está en auge. Los productos de licencia libre como las imágenes satelitales Sentinel-2, permiten correlacionar las propiedades edáficas con índices espectrales.

Vacío de conocimiento: en el sector agrícola, los índices calculados a partir de imágenes satelitales se han centrado en la caracterización de la vegetación. En menor proporción, se han realizado estudios en los que se evalúa la correlación de aquellos aplicados a la prospección mineralógica para correlacionarlos con las características químicas del suelo.

Propósito: este estudio se desarrolló con el objetivo de evaluar la correlación de los índices de óxidos férricos (B_{11}/B_8), silicatos ferrosos (B_{12}/B_{11}), hierro ferroso ($B_{12}/B_8 + B_3/B_4$) y alteración (B_{11}/B_{12}), con el contenido de elementos químicos de importancia en la producción de cultivos.

Metodología: se seleccionó un campo de cultivo de 282 hectáreas en el municipio de Puerto López en el departamento de Meta. Usando una imagen Sentinel-2 se calcularon los índices evaluados. Despues de obtener los índices, se seleccio-

naron 40 sitios para realizar un muestreo compuesto de suelos para determinar las siguientes características: pH en agua (1:1 potenciométrico), Materia Orgánica (Walkey and Black), P (Bray II), Al (KCl 1N), Ca, Mg, K y Na (Acetato de Amonio), Fe (DTPA). Con la información obtenida, se realizó un análisis de regresión múltiple usando el método el "Stepwise"; como variables independientes, se usaron las capas ráster con los índices calculados y como variable a predecir los valores de las propiedades determinadas en el laboratorio.

Resultados y conclusiones: los índices evaluados presentaron una correlación mayor a 0.60 con el contenido de Mg y Ca. Una correlación entre 0.40 y 0.60 fue hallada entre los índices y el contenido de carbono orgánico y Fe. Los modelos de regresión calculados arrojaron ajustes de 0.54, 0.47, y 0.33 para Mg, Ca, y Fe, respectivamente. Los hallazgos de esta investigación permiten concluir que a partir de imágenes Sentinel-2 es posible estimar la concentración de elementos disponibles para las plantas en las condiciones edafoclimáticas de la altillanura colombiana.

Palabras clave: agrimensura, agronomía, altiplano, análisis de datos, mapa del suelo

ABSTRACT

Contextualization: The incorporation of new techniques and technologies to learn about the composition and characteristics of soils used in agricultural production is booming. Free license products such as Sentinel-2 satellite images allow the correlation of soil properties with spectral indices.

Knowledge gap: In the agricultural sector, indices calculated from satellite images have focused on vegetation characterization. To a lesser extent, studies have been conducted to evaluate the correlation of those applied to mineralogical prospecting to correlate them with the chemical characteristics of the soil.

Purpose: This study was developed with to evaluate the correlation of the indexes of ferric oxides (B11/B8), iron silicates (B12/B11), ferrous iron (B12/8 + B3/4), and alteration (B11/B12), with the content of chemical elements of importance in crop production.

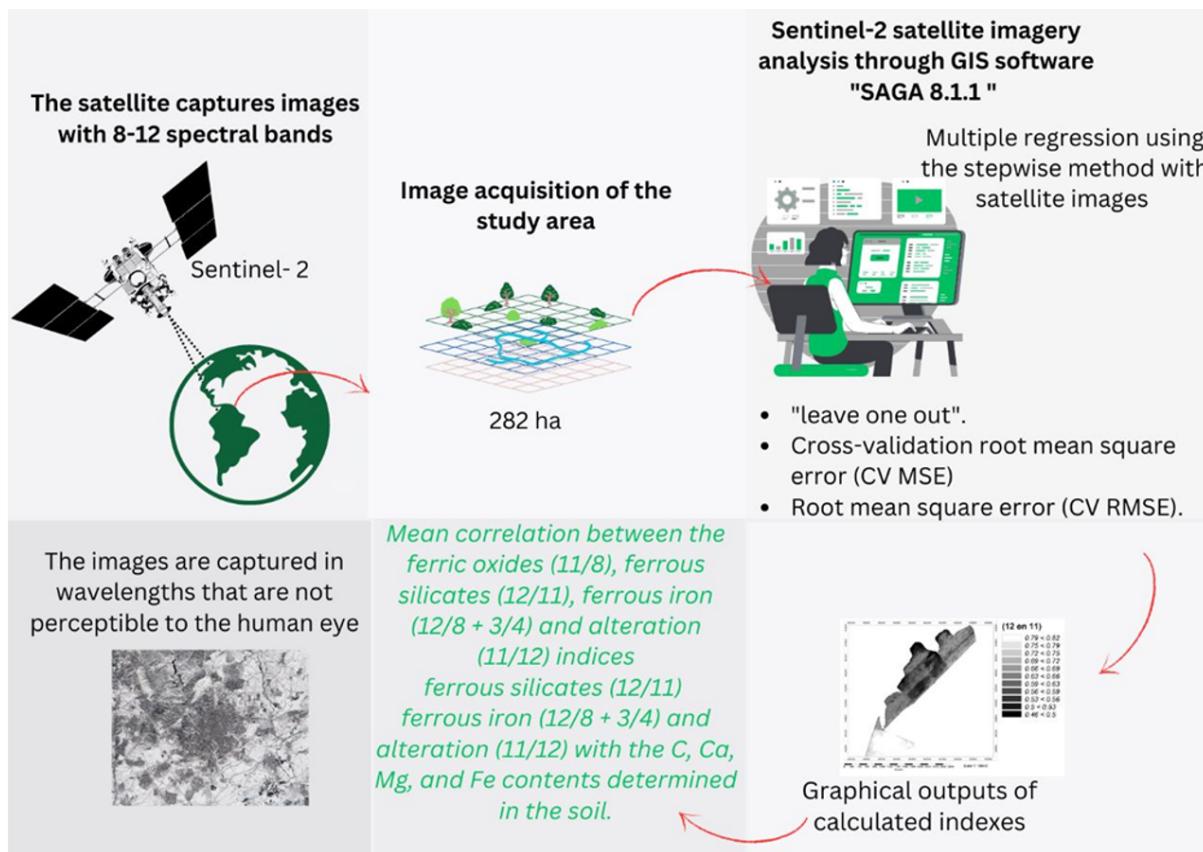
Methodology: A crop of 282 hectares was selected in the municipality of Puerto López in the Meta department. Using a Sentinel-2 image, the evaluated indices were calculated. After obtaining the indices, 40 sites were selected for a composi-

te sampling of soils to determine the following characteristics: pH in water (1:1 potentiometric), organic matter (Walkey and Black), P (Bray II), Al (KCl 1N), Ca, Mg, K, and Na (Ammonium Acetate), Fe (DTPA). With the information obtained, a multiple regression analysis was carried out using the "Stepwise" method. The raster layers with the calculated indices were used as independent variables, and the values of the properties determined in the laboratory were used as the variables to predict.

Results and conclusions: The evaluated indexes showed a correlation greater than 0.60 with Mg and Ca content. A correlation between 0.40 and 0.60 was found between the indices and organic carbon and Fe content. The calculated regression models revealed fits of 0.54, 0.47, and 0.33 to Mg, Ca, and Fe, respectively. The findings of this research lead to the conclusion that it is possible from Sentinel-2 images to estimate the concentration of elements available to plants in the edaphoclimatic conditions of the Colombian Altillanura.

Keywords: agronomy, data analysis, plateaus, soil maps, surveying

■ RESUMEN GRÁFICO



Fuente: autores

1 INTRODUCCIÓN

La era digital ha permeado diferentes aspectos de la vida cotidiana, convirtiéndose en una gran fuerza transformadora de comportamientos y costumbres, la agricultura no es ajena a esta realidad. Un ejemplo de esto, es la utilización de sensores de diferente tipo, drones, técnicas de

minería de datos, el uso de la big data, el aprendizaje de máquinas, que han abierto el camino a la agricultura 4.0 o “agricultura inteligente” (Klerkx, *et al.*, 2019). Desde la década del 60 del siglo XX se reconoce el potencial de la información obtenida por los sensores remotos y la aplicación de los

índices espectrales, como una herramienta para la discriminación de áreas a partir de parámetros de interés agronómico (Jackson 1983). La posibilidad de segmentar áreas heterogéneas en subáreas homogéneas usando sensores e índices, depende en gran medida de las características de las plataformas y de dichos sensores, esto se resume en la resoluciónpectral, espacial y temporal (Xue y Su 2017).

Los índices espectrales son operaciones matemáticas que realizan la transformaciónpectral de un conjunto de bandas capturadas con un sensor remoto, permiten identificar las características específicas de una superficie para que sean representadas en tonos de colores (Bouhennache *et al.* 2019). Los índices espectrales más usados son aquellos que corresponden a divisiones entre bandas, estos relacionan las longitudes de onda en la que los cuerpos objeto de estudio presentan mayor reflectancia y absorbancia, teniendo como resultado que el píxel o grupo de píxeles en el que estos se encuentran sea resaltado en una imagen digital (Sekandari *et al.*, 2020). Gran variedad de índices han sido propuestos para la clasificación de áreas; en Kaur y Pandey (2022); Xue y Su (2017) se hace una revisión detallada de los principales. Los sensores satelitales se utilizan para asistir diferentes tipos de actividades científicas, predicción de tiempo, exploración mineral, cartografía de tierras baldías, gestión de recursos hídricos, cobertura de la tierra, monitoreo de cultivos entre otros (Pei *et al.*, 2021).

Las imágenes hiperespectrales han desempeñado un papel clave en el estudio de las relaciones entre los procesos fisiológicos de la planta y sus características espectrales, permitiendo la creación de indicadores relevantes para la productividad de los cultivos (Berger *et al.*, 2022). El satélite Sentinel-2 toma imágenes multiespectrales a resoluciones espaciales de 10, 20 y 60 m, cuenta con 13 bandas y está incluido dentro del programa Copernicus de monitoreo de la tierra (Houborg *et al.*, 2015). Los índices de óxidos férricos, silicatos ferrosos, hierro ferroso y alteración son las operaciones entre bandas usadas ampliamente en el estudio geológico con la finalidad de discriminar zonas de acumulación de minerales, que pueden ser calculados con las bandas del satélite Sentinel-2 (Van der Meer, *et al.*, 2014).

La altillanura es un paisaje representativo y de importancia agrícola en el departamento del Meta, esta se origina por los procesos tectónicos ocurridos al final del pleistoceno que originan su solevantamiento con respecto a las planicies de aluviales de los ríos Meta y Guayabero (IGAC y CIAF, 2018). Lo anterior tiene como consecuencia el efecto pedogenético de aislamiento, ayudando de forma marcada a los procesos de alteración y pérdida de minerales, favoreciendo el desarrollo de suelos de alto grado de evolución como son los Oxisoles y Ultisoles (Castro 2003). Los estudios de la mineralogía de la fracción arcilla de estos suelos indican la presencia de Caolinita y trazas de Gipsita, que son minerales de alto grado de alteración (IGAC 2004; IGAC y CIAF, 2018). Partiendo de lo



expresado anteriormente se plantea este trabajo con la finalidad de responder la siguiente pregunta: ¿Los índices de silicatos ferrosos y óxidos ferrosos, calculados de

las bandas del satélite Sentinel-2 se pueden correlacionar con el contenido de elementos disponibles en el suelo en un campo de cultivo, en la altillanura colombiana?

2 MATERIALES Y MÉTODOS

Este trabajo se realizó en la finca Santa Helena en el municipio de Puerto López, Meta (latitud 4.181283, longitud -71.989966; WGS-84 EPSG 4326), en un lote de 282.15 hectáreas, que se dedica a la producción de cultivos semestrales. Los suelos de esta finca se clasifican como Typic Hapludox (IGAC 2004); al momento de realizar el estudio el suelo se encontraba sin cobertura vegetal. Inicialmente se realizó un recorrido a pie con la finalidad de hacer la medición del área de estudio usando un GPS Garmin 64SX. La precisión de las coordenadas al momento de realizar la mediciones fue de 3 metros.

Obtención de Imágenes Sentinel-2

La imagen con la que se desarrolló este trabajo se descargó de la página web de la Agencia Espacial Europea (ESA), Copernicus Open Access Hub ([Open Access Hub \(copernicus.eu\)](https://open-access-copernicus.eu/)) (ESA, 2014). Después de realizar el registro en el sitio de internet se descargó la imagen: S2B_MSIL1C_20190406T151709_N0207_R125_

T18NZK_20190406T200611. Según los metadatos, la imagen fue tomada en horas de la tarde (15:17 horas). Toda el área de estudio fue captada por una sola imagen. El porcentaje de nubosidad en el área de estudio fue de cero.

Obtención de índices espectrales

Al conjunto de bandas (B) descargadas se les realizó la corrección atmosférica usando el método de la sustracción del objeto oscuro, proceso que se realizó usando el complemento Semi-Automatic Classification Plugin (SCP) versión 5.42. (Congedo, 2021). Además, se realizó el remuestreo de las bandas para una resolución espacial de 10m. Posteriormente, se calcularon los siguientes índices: óxidos férricos (Ecuación 1), silicatos ferrosos (Ecuación 2), hierro ferroso (Ecuación 3) y alteración (Ecuación 4) (Van der Meer, Van der Werff y Van Ruitenbeek 2014). Las bandas usadas en el cálculo de los índices presentaban las siguientes resoluciones espectrales, banda 3 (35 nm), banda 4 (30

nm), banda 8 (105 nm), banda 11 (90 nm) y banda 12 (180 nm). A partir de los índices obtenidos, se procedió a seleccionar 40 puntos en los que los valores de los índices fueran contrastantes. La selección se

realizó de forma manual. Los puntos seleccionados se cargaron a un GPS Garmin (GPS Garmin 64SX) y fueron los lugares seleccionados para el posterior muestreo de suelo.

$$\text{ÓxidosFérricos} = \frac{\text{Banda11(1610 nm)}}{\text{Banda8(842nm)}} \quad (\text{Ecuación 1})$$

$$\text{SilicatosFerrosos} = \frac{\text{Banda12(2190 nm)}}{\text{Banda11(1610 nm)}} \quad (\text{Ecuación 2})$$

$$\text{HierroFerroso} = \frac{\text{Banda12(2190 nm)}}{\text{Banda8(842 nm)}} + \frac{\text{Banda3(560 nm)}}{\text{Banda4(665 nm)}} \quad (\text{Ecuación 3})$$

$$\text{Alteración} = \frac{\text{Banda11(1640 nm)}}{\text{Banda12(1610 nm)}} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Muestreo de suelos

En cada uno de los 40 puntos seleccionados se tomó una muestra de suelo compuesta de 6 submuestras. Las muestras se tomaron con barreno Edelman hasta los 20 cm de profundidad. A cada una de las muestras se les determinó las siguientes características: pH en agua (1:1 potenciométrico), Materia Orgánica (Walkey and Black), P (Bray II), Al (KCl 1N), Ca, Mg, K y Na (Acetato de Amonio), Fe (DTPA) (IGAC 2006).

Análisis de la información obtenida

Con los valores de los analitos determinados en cada punto y los índices es-

pectrales respectivos, se creó una base de datos que se usó en el cálculo de la correlación de Pearson. Después de identificar las variables que presentaron mayor correlación con los índices calculados, en el programa SAGA GIS versión 8.1.1 (Conrad *et al.* 2015), en el módulo “Spatial and Geostatistics” se realizó un análisis de regresión múltiple, usando el método el “Stepwise”; como variables independientes se usaron las capas ráster del índice de óxidos férricos, silicatos ferrosos, hierro ferroso y alteración, así como variable a predecir la capa de puntos con los valores de las propiedades de los suelos determinadas en el laboratorio (Nipper 2017). A cada uno de los modelos de regresión obtenidos se le realizó la validación cruzada usando el método “Leave one out”.

Además, se determinó el error cuadrático medio de la validación cruzada (CV MSE) y la raíz cuadrada del error medio

(CV RMSE), el proceso de obtención y validación de los resultados se detalla en la Figura 1.

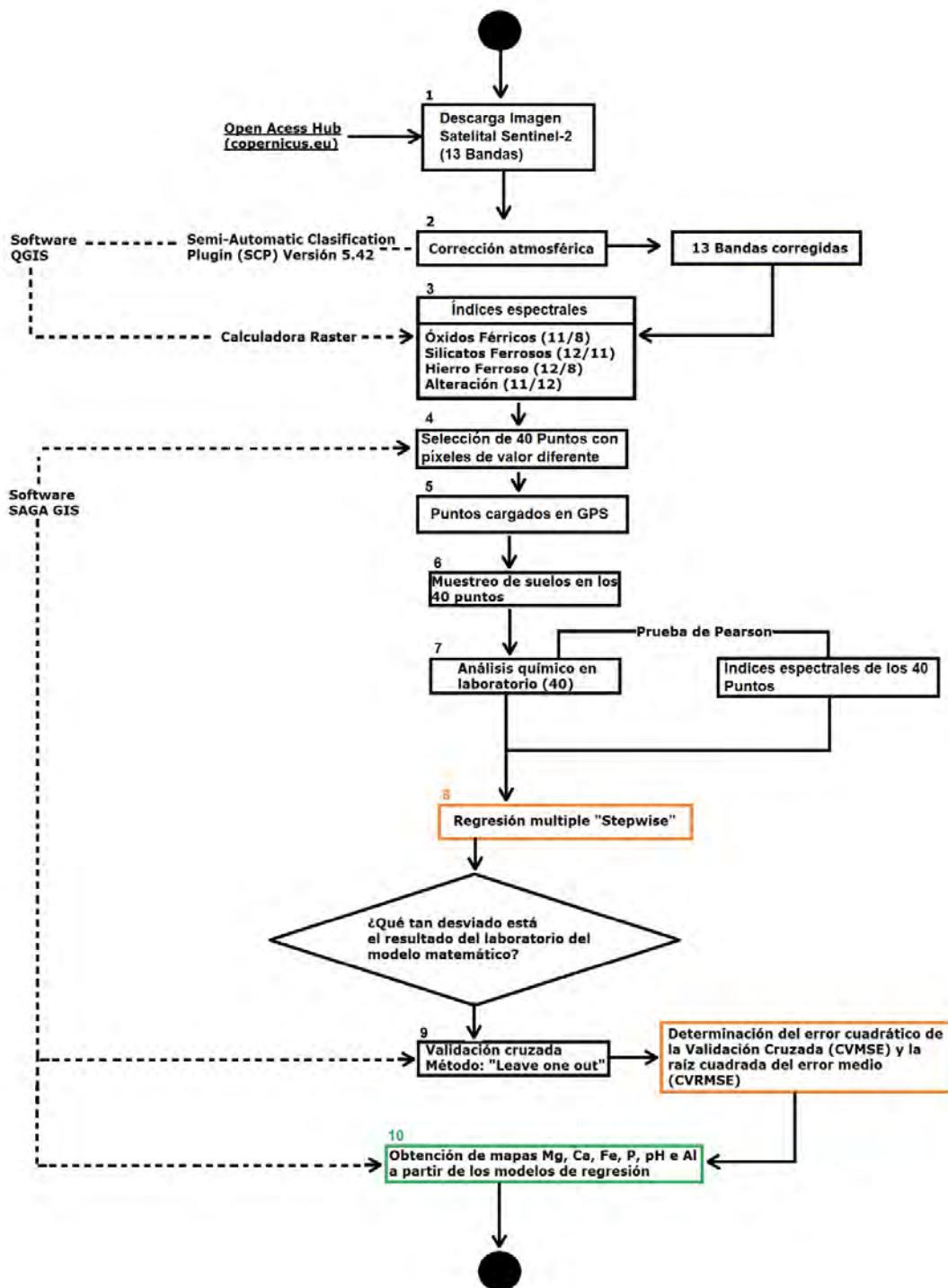


Figura 1. Flujograma de obtención y validación de los resultados.

Fuente: autores.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN 3

De forma general se observó que el contenido de materia orgánica fue de medio a bajo, el pH varió entre 4.5 y 5.6, valores que pueden ser considerados como extremadamente ácido y fuertemente ácido, respectivamente (IGAC, 2004). De las variables determinadas en el suelo, el fósforo y el sodio intercambiable presentaron los coeficientes de variación más altos (por encima del 80%). El promedio del contenido de aluminio intercambiable en el área de estudio fue de 0.51 Cmolc Kg⁻¹, presentando como valor máximo 1.2 Cmolc Kg⁻¹. Llama la atención que los contenidos de Fe presentaron la mayor varianza, la

cual, puede ser atribuida a la aplicación de carbonato de calcio, que tiene efecto en el pH del suelo y en la disponibilidad de los elementos menores, entre ellos el hierro (Bityutskii *et al.*, 2019; Rengel, 2015). Los cationes de reacción alcalina K, Ca y Mg variaron su disponibilidad entre (0.11 – 0.5 Cmolc Kg⁻¹), (0.8–3.2 Cmolc Kg⁻¹) y (0.1-1.2 Cmolc Kg⁻¹) respectivamente. Todos los índices calculados presentaron valores positivos, siendo los más altos para el índice de hierro ferroso y los menores para el de alteración (Tabla 1 y Figura 2). El coeficiente de variación de las operaciones entre bandas se situó de 12 a 17%.

Tabla 1. Resumen de las variables determinadas en el área de estudio

Analito	n	media	D.E	Var	CV	Min	Max
M.O. (%)	40	2.47	0.47	0.22	18.99	1.4	3.2
C%	40	1.39	0.34	0.11	24.18	0.15	1.86
P (mg Kg ⁻¹)	40	9.99	8.26	68.22	82.68	0.3	42.6
pH (1:1)	40	4.99	0.24	0.06	4.86	4.5	5.6
Al (Cmolc Kg ⁻¹)	40	0.51	0.31	0.09	60.82	0	1.2
Ca (Cmolc Kg ⁻¹)	40	1.67	0.54	0.29	32.34	0.8	3.2
Mg (Cmolc Kg ⁻¹)	40	0.55	0.27	0.07	48.49	0.1	1.2
K (Cmolc Kg ⁻¹)	40	0.32	0.1	0.01	31.09	0.11	0.5
Na (Cmolc Kg ⁻¹)	40	0.04	0.03	0.0012	85.71	0.01	0.17
Fe (mg Kg ⁻¹)	40	73.38	34.07	1160.48	46.43	28.13	140.64

CIC (Cmolc Kg ⁻¹)	40	13.56	2.58	6.68	19.06	5.5	18.5
11/8	40	1.65	0.29	0.08	17.52	1.06	2.12
11/12	40	0.66	0.09	0.01	13.53	0.52	0.81
(12/8 + 3/4)	40	2.09	0.26	0.07	12.60	1.73	2.63
11/12	40	1.55	0.20	0.04	13.13	1.24	1.92

n: número de registros, D.E.: desviación estándar, Var: Varianza, CV: Coeficiente de Variación, Max: Máximo, Min: Mínimo.

Fuente: autores.

El valor promedio de los contenidos de P, K, Ca, Mg, y Al hallado en los suelos es calificado como: Bajo, Alto, Bajo, Bajo y No limitante para el desarrollo de los cultivos, respectivamente (Tabla 1) (ICA, 1992; IGAC, 2004). A pesar de que el contenido de la mayoría de los elementos se calificó como bajo, los valores se encuentran por encima de los reportados para los perfiles modales de la zona de estudio y Oxisoles en condiciones naturales (IGAC, 2004; IGAC y CIAF, 2018). Es de resaltar que los valores de CIC (Tabla 1) se encuentran en la franja reportada de esta característica para Oxisoles en campos de cultivo de Costa Rica (Camacho *et al.*, 2021). La variación observada en el contenido de elementos intercambiables en el suelo se explica por las prácticas de manejo usadas en los predios estudiados. Las cuales se fundamentan en la utilización de enmiendas como la cal dolomita, fertilizantes de síntesis química (Urea, DAP y KCL) y la adición de los residuos de las cosechas (Campuzano *et al.* 2014; Pérez y Afanador 2017). Esto tiene como resultado una reducción en el contenido de aluminio intercambiable y un incremento en

el contenido de elementos de importancia en la nutrición vegetal, por encima de niveles que son típicamente reportados en los suelos de la altillanura colombiana (Castro, 2003; IGAC y CIAF, 2018).

En la Tabla 2 sólo se presentan las variables del suelo y los índices espectrales que presentaron correlación significativa o altamente significativa (P-valor por debajo de 0.05). Todos los índices evaluados presentaron una correlación mayor del 60% con el contenido de Ca y Mg; en el caso del índice de alteración (B11/B12), la correlación fue negativa. Una correlación entre 40 y 60 % se presentó para todos los índices con el contenido de carbono orgánico y Fe. El contenido de P se correlacionó de forma positiva con los índices evaluados, excepto para el índice de alteración. El pH y el Aluminio intercambiable presentaron la mejor correlación con el índice de hierro ferroso (B12/B8 + B3/B4), siendo inversa la relación en el caso del Aluminio. Ninguna de las operaciones entre bandas usadas en este trabajo presentaron correlación con el contenido de K intercambiable.

■ Tabla 2. Correlación de Pearson de los índices calculados y las variables del suelo evaluadas

Índice	Propiedad del suelo	n	P	P-Valor
11/8	C%	40	0.52	0.0005
11/8	P (mg Kg ⁻¹)	40	-0.34	0.034
11/8	pH (1:1)	40	0.32	0.0448
11/8	Ca (Cmolc Kg ⁻¹)	40	0.61	<0.0001
11/8	Mg (Cmolc Kg ⁻¹)	40	0.53	0.0005
11/8	Na (Cmolc Kg ⁻¹)	40	-0.35	0.0256
11/8	Fe (mg Kg ⁻¹)	40	0.58	0.0001
12/11	C%	40	0.41	0.0092
12/11	P (mg Kg ⁻¹)	40	-0.33	0.0382
12/11	pH (1:1)	40	0.30	0.0563
12/11	Al (Cmolc Kg ⁻¹)	40	-0.34	0.033
12/11	Ca (Cmolc Kg ⁻¹)	40	0.65	<0.0001
12/11	Mg (Cmolc Kg ⁻¹)	40	0.68	<0.0001
12/11	Fe (mg Kg ⁻¹)	40	0.51	0.0008
(12/8 + 3/4)	C%	40	0.43	0.0051
(12/8 + 3/4)	P (mg Kg ⁻¹)	40	-0.37	0.0193
(12/8 + 3/4)	pH (1:1)	40	0.35	0.0256
(12/8 + 3/4)	Al (Cmolc Kg ⁻¹)	40	-0.36	0.0226
(12/8 + 3/4)	Ca (Cmolc Kg ⁻¹)	40	0.69	<0.0001
(12/8 + 3/4)	Mg (Cmolc Kg ⁻¹)	40	0.69	<0.0001
(12/8 + 3/4)	Na (Cmolc Kg ⁻¹)	40	-0.32	0.045
(12/8 + 3/4)	Fe (mg Kg ⁻¹)	40	0.58	0.0001
11/12	C%	40	-0.44	0.004

11/12	P (mg Kg^{-1})	40	0.30	0.057
11/12	pH(1:1)	40	-0.30	0.063
11/12	Al (Cmolc Kg^{-1})	40	0.31	0.049
11/12	Ca (Cmolc Kg^{-1})	40	-0.63	<0.0001
11/12	Mg (Cmolc Kg^{-1})	40	-0.64	<0.0001
11/12	Fe (mg Kg^{-1})	40	-0.50	0.001

n: número de registros, **P:** valor de la correlación de Pearson, **P-Valor:** Significancia.

Fuente: autores.

La correlación entre el contenido de carbono orgánico del suelo y los índices obtenidos en este trabajo puede ser explicado al uso de las bandas 11 y 12 en los cálculos. Se ha encontrado que dichas bandas tienen una alta correlación con los contenidos de carbono orgánico en el suelo (Gholizadeh *et al.*, 2018). Lo cual se explica en tanto las longitudes de onda entre 1000 nm y 2100 nm se hallan diferentes compuestos del suelo como el agua, diversos minerales de la fracción arcilla y materia orgánica (Viscarra *et al.*, 2011).

La relación entre el contenido de carbono orgánico del suelo y las bandas de Sentinel-2, especialmente aquellas del segmento de infrarrojo de onda corta (SWIR), en campos agrícolas fue comprobada en el trabajo de Castaldi *et al.*, (2019). La causa de este comportamiento se debe a que varios de los compuestos de la materia orgánica del suelo como la lignina, la celulosa y los almidones tienen reflectancia en longitudes de onda entre los 2100 y 2300 nm (Ben-Dor, 1997).

A su vez, la correlación observada entre el índice de óxidos férricos (B11/B8) y el contenido de Fe del suelo (Tabla 2 y Tabla 3), se puede explicar en la detección del proceso de ferralitización que ocurre en suelos con condiciones de buen drenaje, que tiene como resultado la acumulación de óxidos de hierro y aluminio en la fracción arcilla del suelo (Silva *et al.*, 2022). Se ha reportado que los óxidos de hierro tienen una alta capacidad de absorción de longitudes de onda que se encuentran en el rango de 800 a 900 nm (Soydan *et al.*, 2021). Este rango de longitud de onda está contenido en las bandas 8 y 8a de Sentinel-2 (van der Meer *et al.*, 2014).

De los índices calculados el de hierro ferroso (B12/B8 + B3/B4) presentó los valores más altos, en contraposición al de silicatos ferrosos (B12/B11), que arrojó los menores (Figura 2) a, b, c y d). En las salidas gráficas se observa que los óxidos férricos (B11/B8), silicatos ferrosos (B12/B11) y hierro ferroso (B12/B8 + B3/B4) concentran sus valores más altos en

la zona sur y los valores más bajos en la zona central. El índice de alteración tiene un comportamiento inverso en su distri-

bución comparados con los otros índices obtenidos (Figura 2).

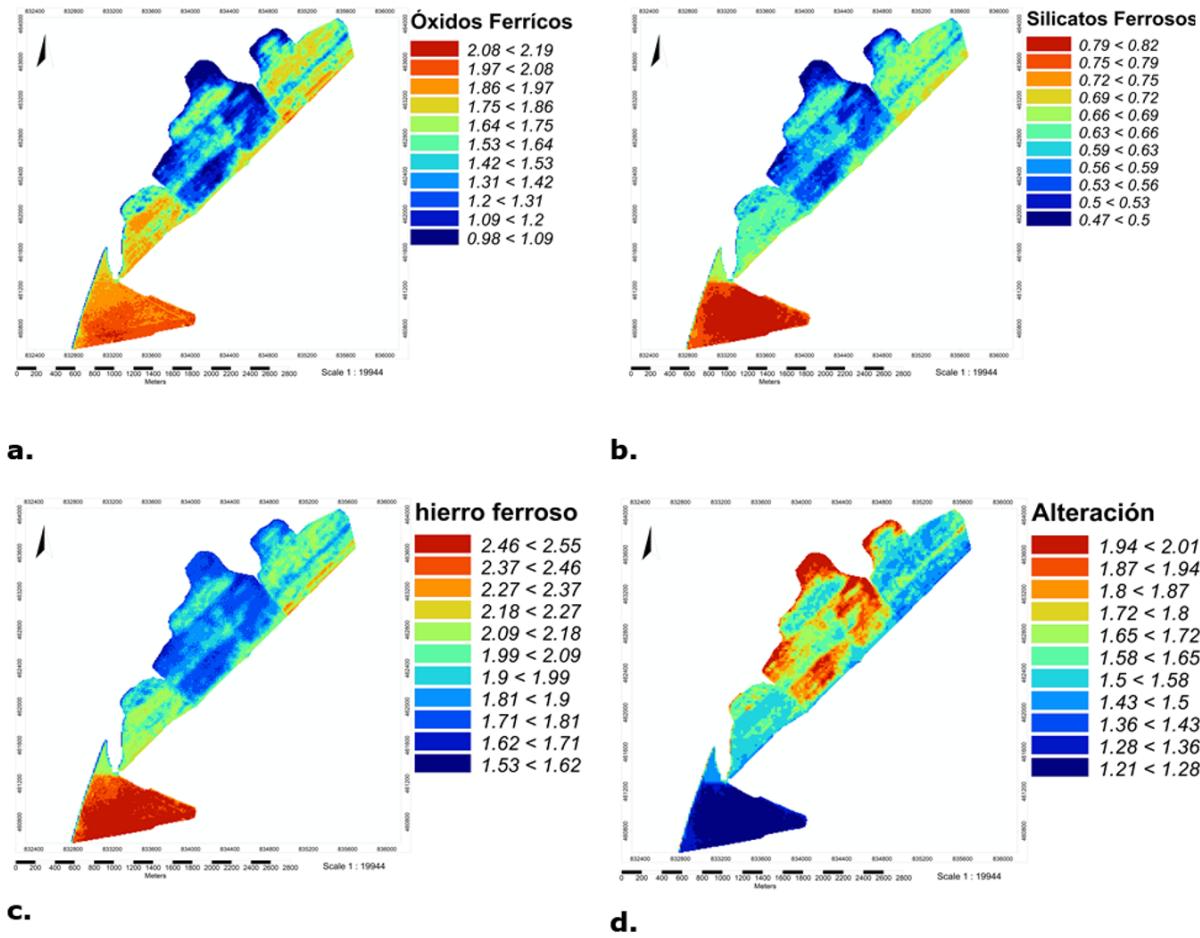


Figura 2. Salidas gráficas de los Índices calculados: a. óxidos férricos (11/8), b. silicatos ferrosos (12/11), c. hierro ferroso (12/8 + 3/4), d. alteración (11/12)

Fuente: autores.

Como resultado del análisis de regresión en el que se relacionaron los índices calculados como variables independientes y los valores de los analitos del suelo como dependientes, se obtuvieron siete modelos

con significancia estadística (Tabla 3). Las operaciones entre bandas que más se presentaron en los modelos fueron el índice de óxidos férricos (B11/B8) y el de hierro ferroso (B12/B8 + B3/B4). Los modelos

planteados con los otros índices no arrojaron significancia estadística. Los mayores ajustes (R^2) se obtuvieron para la determinación de los contenidos de Mg, Ca y Fe, respectivamente. Los menores ajustes para las variables del suelo P, pH y Al. El error

cuadrático medio y la raíz cuadrada del error cuadrático medio de la validación cruzada fueron inferiores para los modelos 1, 6 y 7. El modelo de regresión que presentó mayor error (CV MSE y CV RMSE) fue el obtenido para hierro (Tabla 3).

■ **Tabla 3.** Modelos de regresión múltiple calculados

ID	Modelo	R2	R2VC	CV MSE	CV RMSE
1	Mg**= $(12/8 + 3/4)*1.3065-(11/8)*0.5980-1.1896$	0.54	0.52	0.0378	0.1945
2	Ca**= $(12/8 + 3/4)*1.4059 -1.2739$	0.47	0.45	0.1666	0.4081
3	Fe**= $(11/8)*68.0380-39.1382$	0.33	0.33	815.7026	28.5605
4	C**= $(11/8)*0.6088+0.3871$	0.27	0.25	0.0916	0.3028
5	P*= $(12/8 + 3/4)*-11.5578+34.1496$	0.13	0.13	62.9502	7.9341
6	pH*= $(12/8 + 3/4)*0.3250+4.3105$	0.12	0.11	0.05465	0.2337
7	Al*= $(12/8 + 3/4) + 1.3822$	0.12	0.12	0.0874	0.2464

ID: identificación del modelo, R2: ajuste del modelo, R2VC: Ajuste de la Validación cruzada, CV MSE: error cuadrático medio de la validación cruzada, CV RMSE: raíz cuadrada del error cuadrático medio. **: P-valor > 0.01*: P-valor > 0.05

Fuente: autores.

En la salida gráfica de la concentración de los analitos calculados por los modelos de regresión construidos (Figura 3), se observa que los valores más altos de Mg, Ca, Fe y pH se ubican en la zona sur del área de estudio. Inversamente, los contenidos de P y Al más bajos fueron calculados en el lugar mencionado. En la zona que se calcularon los menores contenidos de P fue la de mayores contenidos de Fe,

según el modelo de regresión. De forma general se observa una variación en la gama de colores en la zona norte y central del área de estudio, en comparación con la zona sur. Esto sugiere una mayor variación de los contenidos de elementos determinados en estas áreas o una mayor sensibilidad de los resultados de la regresión a los datos de entrada.

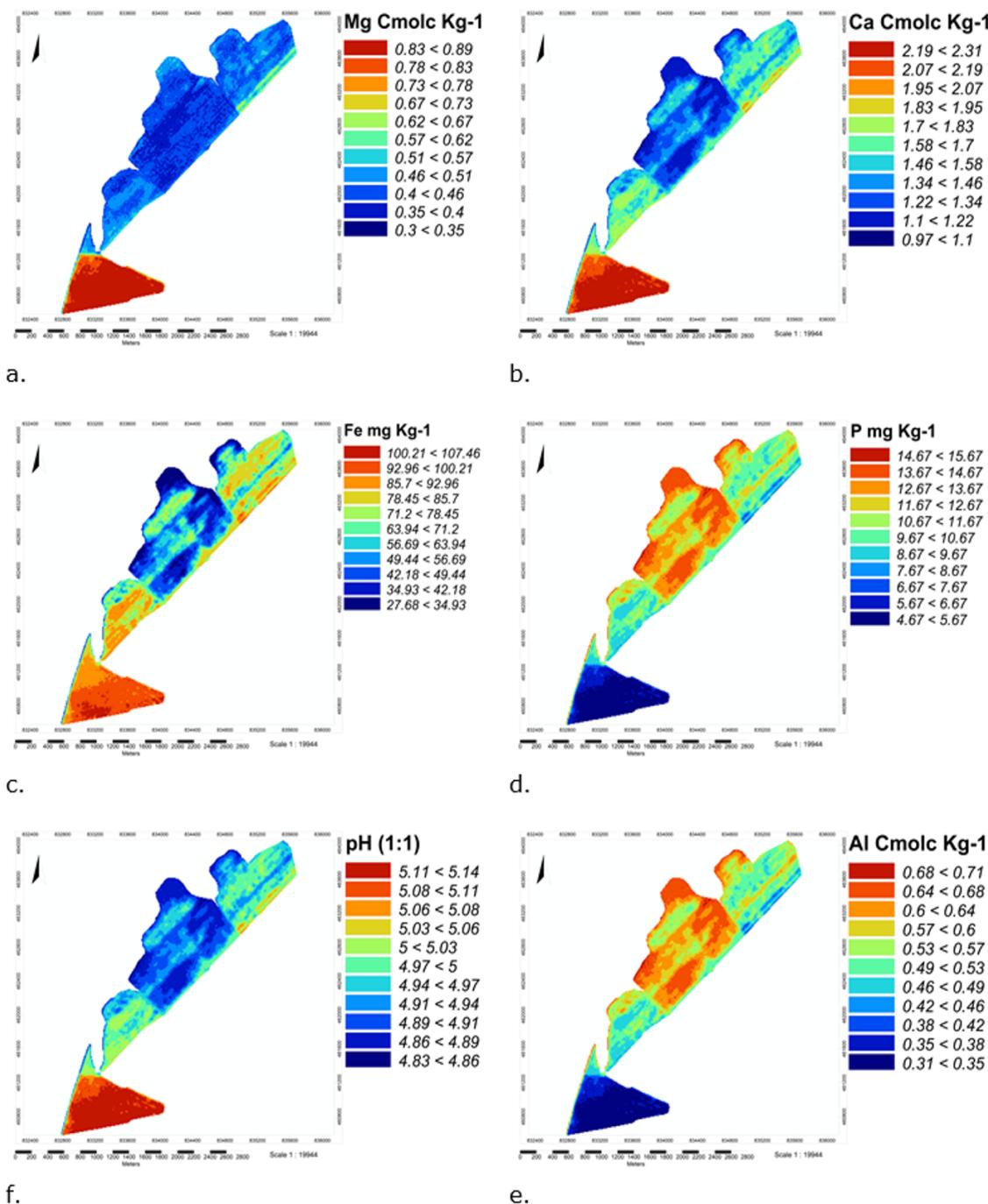


Figura 3. Salidas gráficas de los modelos de regresión calculados:
a. Mg, b. Ca, c. Fe, d. P, f. pH, e. Al

Fuente: autores.

El ajuste de los modelos de regresión usados para determinar los contenidos de Ca y Mg a partir de los índices (B11 / B8) y (B12 / B8 + B3 / B4) llama la atención, especialmente para las condiciones en las que se realiza el estudio y el tipo de índice empleado. Es posible pensar que esta relación se puede estar presentando debido a que una práctica de manejo agronómico en la zona es la aplicación de hasta 5 MG de carbonato de calcio y de magnesio por hectárea (Campuzano *et al.* 2014; Pérez y Afanador 2017). Sin embargo, se ha indicado que las bandas de Sentinel-2 no tienen buena capacidad para discriminar la presencia de carbonatos en el suelo (Van der Meer *et al.*, 2014; Castaldi, 2021), ya que los carbonatos son detectados específicamente a la longitud de onda de 2330 nm, que no es captada por el sensor usado (Vaudour *et al.*, 2019). En este mismo sentido, se ha indicado que la relación de bandas (B11/B12) del sensor Sentinel-2, no es adecuada para el mapeo de carbonatos (Sekandari *et al.*, 2020). Lo que sugiere que puede estar ocurriendo una interacción entre la aplicación de los carbonatos y el contenido de óxidos de Fe en

el suelo (Al-Tarbouli, 2022). Sin embargo, en los diferentes índices usados en este trabajo se usaron bandas de infrarrojo de onda corta (bandas 11 y 12) que, según algunos autores, han sido usadas efectivamente en la detección de alcalinidad en suelos agrícolas (Shahrayini & Noroozi, 2022) y en la detección de algunas rocas carbonatadas (Van der Meer *et al.*, 2014). Adicionalmente, hay que tener en cuenta que el efecto de superposición de bandas puede estar incidiendo en los resultados obtenidos.

En las imágenes Sentinel-2 usadas en este trabajo la resolución espacial fue remuestreada a 10 metros, además la resolución espectral fue de: 35 nm para la banda 3, 30 nm para la banda 4, 105 nm para la banda 8, 90 nm para la banda 11 y 180 nm para la banda 12. Por lo anterior, se puede inferir que la resolución no es tan fina como la de imágenes obtenidas por los sensores de Aster, Modis y Worldview 3, lo que incide en la capacidad de discriminar minerales de una forma más eficiente (Van der Meer *et al.*, 2014; Sekandari *et al.*, 2020).

4 CONCLUSIONES

Se encontró una correlación positiva entre los índices de óxidos férricos (B11 / B8), silicatos ferrosos (B12 / B11), hierro férreo (B12 / B8 + B3 / B4) y alteración (B11 /

B12) obtenidos de imágenes Sentinel-2 y el contenido de Ca, Mg y Fe disponible en el suelo (correlación de Pearson entre 0.51 y 0.69). Además, usando los índices

de hierro ferroso ($B_{12}/B_8 + B_{3}/B_4$) y alteración (B_{11}/B_{12}) como variables independientes, fue posible construir modelos matemáticos con significancia estadística para determinar el contenido de: Mg, Ca, Fe, C, P, pH y Al en el suelo. La validación cruzada muestra un mejor desempeño de los modelos de regresión que determinan el Mg y Ca disponible (validación cruza-

da de 0.52 y 0.45, respectivamente), los modelos de regresión para determinar P, pH y Al no presentaron una validación cruzada superior a 0.13. Finalmente, en próximos estudios es necesario explorar otros índices, otros modelos de regresión como los no lineales y otras condiciones de manejo que se puedan presentar en la región de la altiplanura colombiana.

CONTRIBUCIÓN DE LA AUTORÍA ■

Andrés Felipe Gómez Chávez: logística, investigación y conceptualización. Jeimy Katherin Feo Mahecha: revisión y edición. Sergio David Parra

González: investigación, conceptualización, metodología, análisis de datos, escritura, revisión y edición.

AGRADECIMIENTOS ■

El equipo de trabajo expresa el más sincero agradecimiento a la empresa CMG Agro SAS, por la financiación de los análisis especializados requeridos para el desarrollo del trabajo.

LITERATURA CITADA ■

Al-Tarbouli, N. H. Y. (2022). Adsorption and physicochemical release of iron ions in soils with different content of Calcium Carbonate and Calcium

Sulfate. *Tikrit journal for agricultural sciences*, 22(3), 137-147. <https://doi.org/10.25130/tjas.22.3.16>

Ben-Dor, E. (1997). The reflectance spectra of organic matter in the visible near-infrared and short-wave infrared region (400–2500 nm) during a controlled decomposition process. *Remote Sensing of Environment*, 61(1), 1-15. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00120-4](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00120-4)

Berger, K., Machwitz, M., Kycko, M., Kefauver, S. C., Van Wittenberghe, S., Gerhards, M., Verrelst, J., Atzberger, C., Van Der Tol, C., Damm, A., Rascher, U., Herrmann, I., Paz, V. S., Fahrner, S., Pieruschka, R., Prikaziuk, E., Buchaillet, Ma. L., Halabuk, A., Celesti, M., ... and Schlerf, M. (2022). Multi-sensor spectral synergies for crop stress detection and monitoring in the optical domain: A review. *Remote Sensing of Environment*, 280, 113198. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113198>

Bityutskii, N. P., Yakkonen, K. L., Petrova, A. I., Lukina, K. A., and Shavarda, A. L. (2019). Calcium Carbonate Reduces the Effectiveness of Soil-Added Monosilicic Acid in Cucumber Plants. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 19(3), 660–670. <https://doi.org/10.1007/s42729-019-00066-3>

Bouhennache, R., Bouden, T., Taleb-Ahmed, A., and Cheddad, A. (2019). A new spectral index for the extraction of built-up land features from Landsat 8 satellite imagery. *Geocarto International*, 34(14), 1531-1551. <https://doi.org/10.1080/10106049.2018.1497094>

Camacho, M. E., Mata, R., Barrales-Víquez, M., and Alvarado, A. (2021). Morphology and characteristics of eight Oxisols in contrasting landscapes of Costa Rica. *CATENA*, 197, 104992. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104992>

Campuzano, D. L. F., Caicedo, G. S., Narro, L., and Alfonso, H. (2014). *Corpoica H5: Primer híbrido de maíz amarillo de alta calidad de proteína (QPM) para la altiplanura plana colombiana*. Ciencia y Tecnología Agropecuaria.

Castaldi, F. (2021). Sentinel-2 and Landsat-8 Multi-Temporal Series to Estimate Topsoil Properties on Croplands. *Remote Sensing*, 13(17), 3345. <https://doi.org/10.3390/rs13173345>

Castaldi, F., Hueni, A., Chabrillat, S., Ward, K., Buttafuoco, G., Bomans, B., Vreys, K., Brell, M., and Van Wesemael, B. (2019). Evaluating the capability of the Sentinel 2 data for soil organic carbon prediction in croplands. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 147, 267-282. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.11.026>

Castro, D. M. (2003). Ensayo sobre tipología de suelos colombianos-Énfasis en génesis y aspectos ambientales. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 27(104), 319-341.

Congedo, L. (2021). Semi-Automatic Classification Plugin: A Python tool

for the download and processing of remote sensing images in QGIS. *Journal of Open-Source Software*, 6(64), 3172. <https://doi.org/10.21105/joss.03172>

Conrad, O., Bechtel, B., Bock, M., Dietrich, H., Fischer, E., Gerlitz, L., Wehberg, J., Wichmann, V., and Böhner, J. (2015). System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4. *Geoscientific Model Development*, 8(7), 1991-2007. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-1991-2015>

ESA. (2014). *Copernicus Open Access Hub*. Copernicus Open Access Hub. <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>

Gholizadeh, A., Žižala, D., Saberioon, M., and Borůvka, L. (2018). Soil organic carbon and texture retrieving and mapping using proximal, airborne and Sentinel-2 spectral imaging. *Remote Sensing of Environment*, 218, 89-103. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.09.015>

Houborg, R., Fisher, J. B., and Skidmore, A. K. (2015). Advances in remote sensing of vegetation function and traits. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 43, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.06.001>

Instituto Colombiano Agropecuario. (ICA). (1992). *Fertilización en diversos cultivos: Quinta aproximación*. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/14124>

Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (IGAC). (2004). *Estudio general de suelos y zonificación de tierras: Departamento del*

Meta. (2da ed.). Imprenta Nacional de Colombia.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (IGAC). (2006). *Métodos analíticos del laboratorio de suelos* (6ta ed.). Imprenta Nacional de Colombia.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (IGAC) y CIAF. (2018). *La altiplanura colombiana: Aspectos biofísicos*. Imprenta Nacional de Colombia.

Jackson, R. D. (1983). Spectral indices in N-Space. *Remote Sensing of Environment*, 13(5), 409-421. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(83\)90010-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(83)90010-X)

Kaur, R., and Pandey, P. (2022). A review on spectral indices for built-up area extraction using remote sensing technology. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(5), 391. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-09688-x>

Klerkx, L., Jakku, E., and Labarthe, P. (2019). A review of social science on digital agriculture, smart farming, and agriculture 4.0: New contributions and a future research agenda. *NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences*, 90-91, 100315. <https://doi.org/10.1016/j.njas.2019.100315>

Nipper, H.: G. B. E. G. N. M. J. (Ed.). (2017). *Statistische Methoden in der Geographie*. Schweizerbart Science Publishers. <http://www.schweizerbart.de/publications/detail/isbn/9783443071547/Bahrenberg\Giese\Mevenkamp\Nipper\S>

- Pei, T., Xu, J., Liu, Y., Huang, X., Zhang, L., Dong, W., Qin, C., Song, C., Gong, J., and Zhou, C. (2021). GIScience and remote sensing in natural resource and environmental research: Status quo and future perspectives. *Geography and Sustainability*, 2(3), 207-215. <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2021.08.004>
- Pérez, O. y Afanador, G. (2017). Comportamiento agronómico y nutricional de genotipos de Brachiaria spp. Manejados con fertilización nitrogenada, solos y asociados con Pueraria phaseoloides, en condiciones de la altillanura colombiana. *Revista de la Facultad de Medicina Veterinaria y de Zootecnia*, 64(3), 52-77. <https://doi.org/10.15446/rfmvz.v64n3.68694>
- QGIS Development Team. (2016). *QGIS 2.18.17—Las Palmas*. (2.18.17).
- Rengel, Z. (2015). Availability of Mn, Zn and Fe in the rhizosphere. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 15(2), 397-409. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162015005000036>
- Sekandari, M., Masoumi, I., Beiranvand Pour, A., M Muslim, A., Rahmani, O., Hashim, M., Zoheir, B., Pradhan, B., Misra, A., and Aminpour, S. M. (2020). Application of Landsat-8, Sentinel-2, ASTER, and WorldView-3 Spectral Imagery for Exploration of Carbonate-Hosted Pb-Zn Deposits in the Central Iranian Terrane (CIT). *Remote Sensing*, 12(8), 1239. <https://doi.org/10.3390/rs12081239>
- Shahrayini, E., and Noroozi, A. A. (2022). Modeling and Mapping of Soil Salinity and Alkalinity Using Remote Sensing Data and Topographic Factors: A Case Study in Iran. *Environmental Modeling & Assessment*, 27(5), 901-913. <https://doi.org/10.1007/s10666-022-09823-8>
- Silva, F. M., Silva, S. H. G., Teixeira, A. F. D. S., Inda, A. V., Fruett, T., Weindorf, D. C., Guilherme, L. R. G., and Curi, N. (2022). Using proximal sensors to assess pedogenetic development of Inceptisols and Oxisols in Brazil. *Geoderma Regional*, 28, e00465. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00465>
- Soydan, H., Koz, A., and Düzgün, H. S. (2021). Secondary Iron Mineral Detection via Hyperspectral Unmixing Analysis with Sentinel-2 Imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 101, 102343. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102343>
- Van der Meer, F. D., Van der Werff, H. M. A., and Van Ruitenbeek, F. J. A. (2014). Potential of ESA's Sentinel-2 for geological applications. *Remote Sensing of Environment*, 148, 124-133. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.03.022>
- Vaudour, E., Gomez, C., Fouad, Y., and Lagacherie, P. (2019). Sentinel-2 image capacities to predict common topsoil properties of temperate and Mediterranean agroecosystems. *Remote Sensing of Environment*, 223, 21-33. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.01.006>

Viscarra Rossel, R. A., Chappell, A., De Caritat, P., and McKenzie, N. J. (2011). On the soil information content of visible-near infrared reflectance spectra. *European Journal of Soil Science*, 62(3), 442-453. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2011.01372.x>

Xue, J., and Su, B. (2017). Significant Remote Sensing Vegetation Indices: A Review of Developments and Applications. *Journal of Sensors*, 2017, 1353691. <https://doi.org/10.1155/2017/1353691>

Conflictos de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

**Licencia de Creative Commons**

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



Fecha de recibido: 07-08-2023
Fecha de aceptado: 30-11-2023
DOI: 10.22490/21456453.7061

MAYZE YIELD AND CHANGES IN THE CHEMICAL ATTRIBUTES OF SOIL FERTILIZED WITH MALT SLUDGE

RENDIMIENTO DE MAÍZ Y CAMBIOS EN LOS ATRIBUTOS QUÍMICOS DEL SUELO FERTILIZADO CON LODO DE MALTA

Paulo Fortes Neto ¹

Nara Lúcia Perondi Fortes ²

Lucilene Carvalho Silva ³

¹ Teacher Doctor of the Graduate Program in Environmental Sciences of University of Taubaté (UNITAU), Taubaté, Brasil. paulo.fortes@unitau.br

² Teacher Doctor of the Graduate Program in Environmental Sciences of University of Taubaté (UNITAU), Taubaté, Brasil. nara.fortes@unitau.br

³ Master of Science and Health, Safety, Environment and Quality Manager (HSEQ) from Malting Soufflet Brasil, Taubaté, Brasil. lcarvalhosilva@soufflet.com

Citación: Neto, P., Fortes, N. y Silva, L. (2024). Mayze yield and changes in the chemical attributes of soil fertilized with malt sludge. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 15(2), 291-309. <https://doi.org/10.22490/21456453.7061>

■ ABSTRACT

Contextualization: The malt house's sludge is an organic matter which contains nutrients for plants. Therefore, its utilization as organic fertilizer is an alternative to landfilling, because during the handling the sludge does not have contact with pathogenic organisms and trace metals.

Knowledge gap: There are only a few studies to appraise the malt house's sludge as an organic fertilizer. In contrast, most of the studies are conducted with sewage sludge generated by the urban wastewater treatment system.

Purpose: To appraise the corn's productivity and the fertility of the soil fertilized with sludge's portions in comparison with mineral fertilization.

Methodology: The study was conducted based on randomized blocks design with five ways of treatment (T_1 = no fertilization; T_2 = mineral fertilization; T_3 = 24 Mg ha⁻¹ of sludge; T_4 = 48 Mg ha⁻¹ of sludge and T_5 = 72 Mg ha⁻¹ of sludge) and four repetitions. During the sowing were distributed nine seeds per linear meter at a spacing of 0,80 cm between rows. After one hundred days from sowing, the cobs of ten plants located in the useful portion

plot were collected in order to remove the grains. The grains were placed in an oven at 65 °C, until they reached constant weight to determine the dry mass. The productivity was estimated by extrapolating the grain dry mass data of the useful plot to one hectare. Soil samples were collected to assess soil fertility. The results were submitted to variance analysis and the differences between the averages to the Tukey test at 5%.

Results and conclusions: The grain productions obtained with 24, 48 and 72 Mg ha⁻¹ of sludge were 18,67, 28,00 and 40,66% higher than that observed with mineral fertilization. The results of grain yields with the doses of sludge were in the average of productivity observed in Brazil. The dosages of sludge increased the availability of phosphorus from 26,7 mg dm⁻³ in the soil with mineral fertilization to 94,0 mg dm⁻³ with 72 Mg ha⁻¹ of sludge, respectively. According to these results it can be concluded that the sludge has agronomic quality, and the dose of 24 Mg ha⁻¹ optimized the productivity of maize.

Keywords: Agricultural Production, Mineral Nutrients, Organic Sludge, Plant Nutrition, Substantiable Agriculture

RESUMEN

Contextualización: el lodo de malta es un material orgánico que contiene nutrientes para las plantas, así que su utilización como fertilizante orgánico se presenta como una alternativa a los vertederos, ya que durante el procesamiento los residuos no entran en contacto con los organismos patógenos ni con los metales pesados.

Vacío de conocimiento: son escasos los estudios para evaluar los lodos de maltería como abono orgánico; por otro lado, la mayoría de los trabajos se han realizado con lodos de saneamiento generados por el sistema de tratamiento de efluentes y sanitarios urbanos.

Propósito: evaluación del rendimiento del maíz y de la fertilidad del suelo fertilizado con dosis de lodos en comparación con la fertilización mineral.

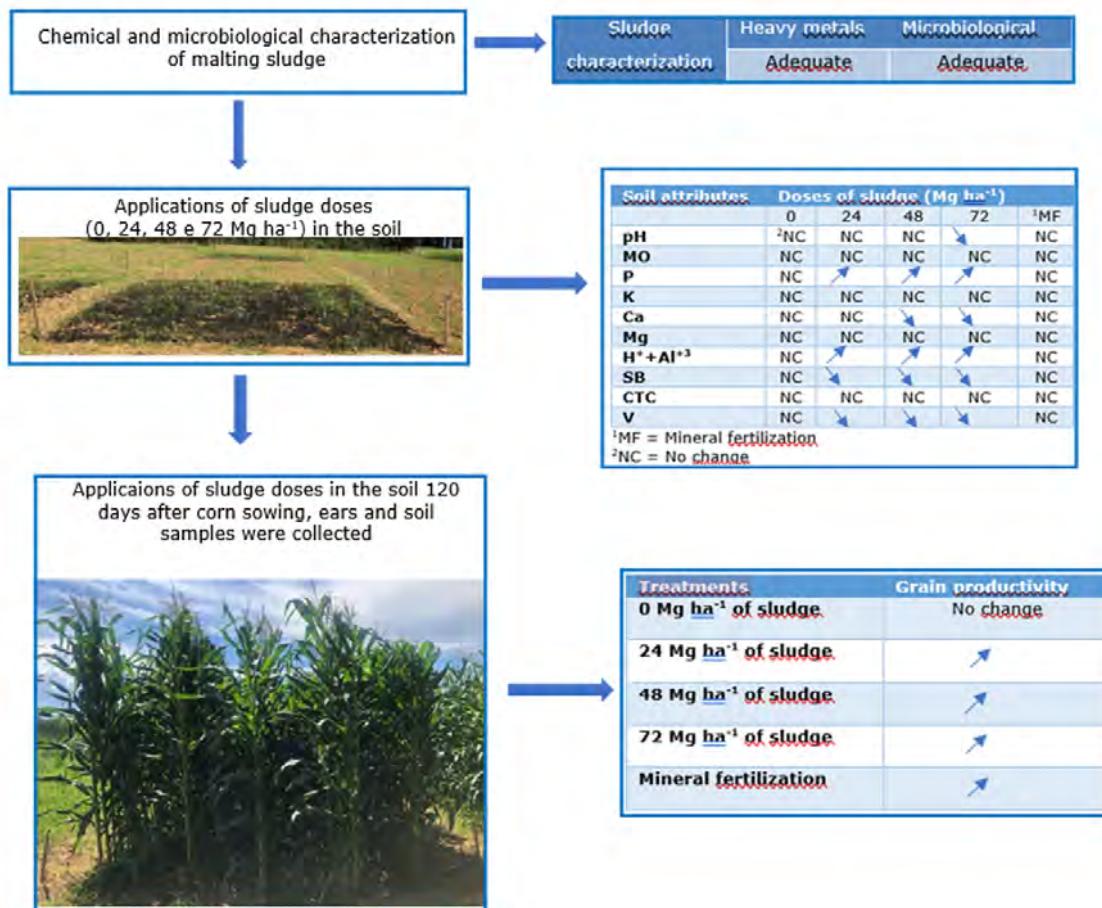
Metodología: el experimento se realizó en un diseño de bloques al azar con cinco tratamientos (T_1 = sin fertilización; T_2 = fertilización mineral; $T_3 = 24 \text{ Mg ha}^{-1}$ de lodos; $T_4 = 48 \text{ Mg ha}^{-1}$ de lodos y $T_5 = 72 \text{ Mg ha}^{-1}$ de lodos) y cuatro repeticiones. En la siembra se distribuyeron 9 semillas por metro lineal y un espaciado de 0,80 cm entre hileras. A los 100 días después de la siembra, se recogieron las espigas

de diez plantas situadas dentro de la parcela útil para extraer los granos. Los granos se introdujeron en una estufa a 65 °C hasta alcanzar un peso constante para determinar la masa seca. El rendimiento se estimó extrapolando los datos de masa seca de los granos de la parcela útil a una hectárea. Se recogieron muestras de suelo para evaluar su fertilidad. Los resultados se sometieron a análisis de varianza y las diferencias entre medias a la prueba de Tukey al 5%.

Resultados y conclusiones: el rendimiento de grano obtenido con 24, 48 y 72 Mg ha⁻¹ de lodos fue 18,67, 28,00 y 40,66% superior a los observados con fertilización mineral. Los rendimientos de grano con las dosis de lodos estuvieron dentro del rendimiento medio observado en Brasil. Las dosis de lodo aumentaron la disponibilidad de fósforo de 26,7 mg dm⁻³ en el suelo con fertilización mineral a 94,0 mg dm⁻³ con 72 Mg ha⁻¹ de lodo, respectivamente. Sobre la base de estos resultados, se desprende que los lodos tienen calidad agronómica y que la dosis de 24 Mg ha⁻¹ optimizó la productividad del maíz.

Palabras clave: agricultura sostenible, nutrición de las plantas, nutrientes minerales, producción agrícola

GRAPHICAL ABSTRACT



Source: authors.

1 INTRODUCTION

During the malting process, barley grains (*Hordeum vulgare L.*) are macerated and alternately submitted to both dry and wet periods where the leaching and hydration of the grains takes place.

Further, the grains are submitted to germination, where the activation of enzymes and the solubilization of carbohydrates and proteins is observed, which results in the production of green malt that is dried

and roasted and the effluent is treated in the activated sludge treatment system and after passing through the filter press, the malt plant sludge is produced (Muzzolon et al., 2021). The sludge is an organic material which contains in its chemical composition essential nutrients for agricultural plants, therefore its use as an organic fertilizer presents itself as an alternative to landfill disposal, because its generation results from a process without contact with pathogenic organisms and heavy metals (Miranda, 2013). Despite these qualities, studies to evaluate the efficiency of malt sludge as an organic fertilizer for agricultural crops are scarce or even non-existent, on the other hand, most works are carried out with sewage sludge generated by the urban wastewater treatment system (Baioui et al., 2017; Cerón et al., 2017; Gonçalves et al., 2019; Abreu-Júnior, et al., 2019; Ippolito, et al., 2021). Those studies have shown promising results of the application of sewage sludge doses in the increase of grain yields of several crops, increments in the uptake of macronutrients and micronutrients and improvements in soil fertility. Regarding sewage sludge application and grain yield, some researchers observed that productivity increased with the doses of sewage sludge applied to the soil and the highest values were obtained with doses ranging between 15 and 30 Mg ha⁻¹ of sludge (dry basis) (Bremm et al., 2012; Gonçalves et al., 2019).

Among the effects of sewage sludge on the chemical composition of the soil,

Trannin et al. (2008) found that soil fertility improved with the application of sewage sludge at doses greater than 12 Mg ha⁻¹ (dry basis). Similar results were also observed by other authors who reported the increase of nitrogen (Pires et al., 2015), phosphorus (Bonini et al., 2015), organic matter (Ippolito et al., 2021) and cation exchange capacity (Pereira et al., 2015) when compared with soil from areas without sludge application and with mineral fertilization. According to Stehouwer (2000), these results are associated with the fact that one ton of sludge may, depending on its composition, add about 37 to 50 kg of nitrogen and 13 to 24 kg of phosphorus to the soil. Sewage sludge also presents in its composition significant amounts of magnesium, sulfur, and micronutrients such as iron, copper, zinc, and manganese that are sufficient to meet the needs of most agricultural crops, even when applied in doses below 10 Mg ha⁻¹ of (dry basis) in the soil (Bremm et al., 2012; Bittencourt et al., 2017). These differences in the doses of sewage sludge in terms of nutrient supply and soil fertility are related to the system of treatments, the chemical composition of the sludge, the types of soil and the crop used (Bueno et al. 2011; Coscione et al. 2014).

However, potassium, due to its low concentration in the sludge composition, resulting from its high solubility in water, has been the element that does not increase with increasing doses of sludge applied to the soil (Andreoli et al., 2014; Nobile et al., 2014; Gonçalves et al., 2019).

In addition, some authors have also reported that the use of sewage sludge as an organic fertilizer could replace or even reduce the use of nitrogen and phosphate fertilizers applied to agricultural crops (Bittencourt et al., 2017; Gonçalves et al., 2019). Knopik et al. (2018) conducting a survey in areas where sewage sludge was applied at a dose of 7 Mg ha^{-1} (dry basis) between 2012 to 2016 found that farmers reduced the purchase of fertilizers and limestone, as an average contribution to the soil of 912 kg ha^{-1} of organic carbon,

582 kg ha^{-1} of total calcium, 160 kg ha^{-1} total nitrogen, 143 kg ha^{-1} of magnesium, 24 kg ha^{-1} of phosphorus, 22 kg ha^{-1} of Sulphur, 6 kg ha^{-1} of sodium, 4 kg ha^{-1} of potassium and of $2,15 \text{ kg ha}^{-1}$ and $0,76 \text{ kg ha}^{-1}$, respectively for the micronutrients zinc and copper.

Based on the exposed, this work aimed to evaluate maize productivity and soil chemical attributes fertilized with doses of malt sludge in comparison with mineral fertilization.

2

MATERIALS AND METHODS

The experiment was developed during 120 days in an experimental area of the Pilot Farm of the Department of Agricultural Sciences of the University of Taubaté (UNITAU), Taubaté, São Paulo, Brazil, located at an altitude of 577 masl and with the geographical coordinates $23^{\circ}02'34''$ S and $45^{\circ}31'02''$ W. The climate is of type Cwa (Sub-tropical), with summer rains and an average annual precipitation of 1,300 mm (Fisch, 1995). The area has a medium-textured dystrophic Red-Yel-

low Latosol (Embrapa, 2006) or Ferralsol (IUSS Working Group WRB, 2015).

Figure 1 presents the monthly pluviometric rainfall averages for the period between planting (October 2021) and harvesting (February 2022) of the maize. Around 941.60 mm of rain was provided during the period, thus there was no need to irrigate the maize crop, as the water provided by the rain was above the 800 mm figure considered adequate for maize development (Embrapa, 2004).

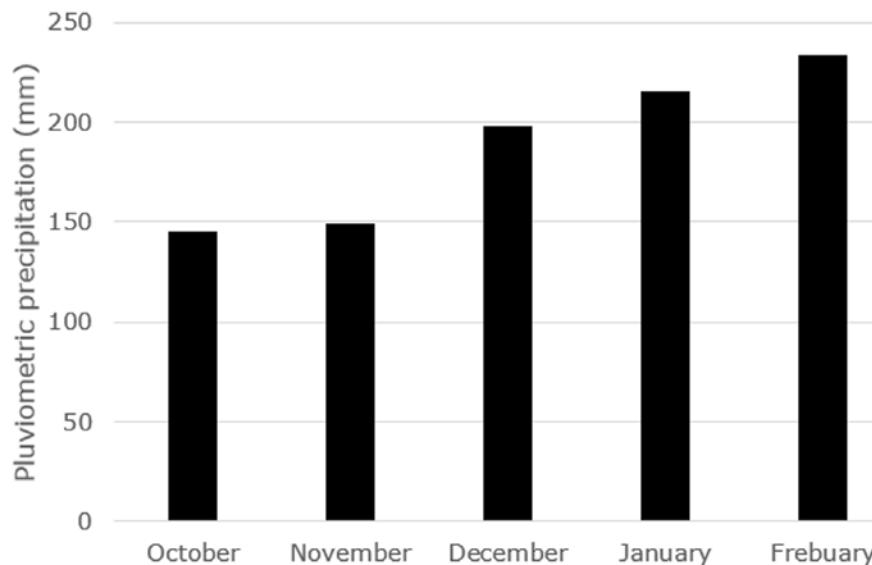


Figure 1. Monthly values of the accumulated pluviometric precipitation during the experimental period from October 2021 to February 2022

Source: authors.

The malt sludge was obtained from the Industrial Effluent Treatment Plant of the company Malteria Soufflet Brasil Ltda, located in Taubaté, in the State of São Paulo, Brazil. For the chemical characterization of the sewage sludge (Table 1) six single samples were collected at different points of the waste mass, which were homogenized and pooled into one composite sample.

The levels of heavy metals and the most probable number (MPN) of thermotolerant coliforms and *Salmonella* sp. in the malt sludge (Table 1), meet the limits stipulated by CETESB Technical Standard P.4230/2021 which establishes the limits and procedures for the application of sludge in agricultural areas in the State of São Paulo, Brazil.

For the initial chemical characterization of the soil, four simple soil samples were collected randomly in the 0-20 cm depth layer. After being collected the samples were mixed and homogenized to compose a composite sample to be evaluated for soil fertility, according to the methodology proposed by Raij et al. (2001). The soil presented the following chemical composition: pH (CaCl_2) = 5,5; nitrogen (g kg^{-1}) = 0,67; phosphorous (mg dm^{-3}) = 24; organic matter (g dm^{-3}) = 14,4; potassium (mmolc dm^{-3}) = 4,0; calcium (mmolc dm^{-3}) = 25; magnesium (mmolc dm^{-3}) = 14; hydrogen + aluminum (mmolc dm^{-3}) = 25; sum of bases (mmolc dm^{-3}) = 43,0; cation exchange capacity (mmolc dm^{-3}) = 68,0 and base saturation (%) = 63. The same procedures were used to collect the soils in the 20 plots after 100 days of maize sowing.

Table 1. Chemical composition and pathogenicity characteristics of malt sludge

Topic	Results	(¹)Limits
Arsenic (mg kg ⁻¹)	< 0,05	75
Cadmium (mg kg ⁻¹)	< 2	0,5
Cooper (mg kg ⁻¹)	< 2	4.300
Chrome (mg kg ⁻¹)	< 2	500
Lead (mg kg ⁻¹)	< 3	840
Mercury (mg kg ⁻¹)	< 0,001	57
Nickel (mg kg ⁻¹)	< 6	75
Selenium (mg kg ⁻¹)	< 0,01	100
Zinc (mg kg ⁻¹)	< 1	7.500
pH	7,0	5,5 – 7,0
Kjeldahl nitrogen (mg kg ⁻¹)	16.562,50	-
Ammoniacal nitrogen (mg kg ⁻¹)	41,5	
Inorganic nitrogen (nitrite + nitrate) (mg kg ⁻¹)	<10,0	
Phosphor (mg kg ⁻¹)	9,8	-
Potassium (mg kg ⁻¹)	334,4	-
Sodium (mg kg ⁻¹)	43,3	-
Organic carbon (%)	11,5	-
Moisture (%)	88,40	-
Thermotolerant coliforms (NMP/g ST)	83,05	1.000
Salmonella sp (NMP/4g ST)	Ausente	3

(¹)Technical Standart CETESB P.4230/2021

Source: authors.

The experimental design used was in randomized blocks with five treatments and four repetitions, being the size of the parcels of 25 m² (5 x 5 m). The treatments used were without sludge application (0 Mg ha⁻¹); with mineral fertilization (AM); 24, 48 and 72 Mg ha⁻¹ of sludge (dry base). The doses of 24, 48 and 72 Mg ha⁻¹ of

sludge provided 120: 240 and 360 kg ha⁻¹ of nitrogen, respectively.

The twenty experimental plots were marked out and then 2,0 Mg ha⁻¹ dolomitic limestone was applied, plowed, and harrowed to a depth of 20 cm of soil. After 50 days, the sludge was superficially applied and distributed in each plot in quan-

tities of 24, 48 and 72 Mg ha⁻¹ (dry base) and then, with the aid of a rotary hoe the sludge was incorporated to a soil depth of 20 cm. In the treatment with mineral fertilization, 20 kg ha⁻¹ of nitrogen, 50 kg ha⁻¹ of phosphorus (P₂O₅) and 30 kg ha⁻¹ of potassium (K₂O) fertilizers were applied at planting; and 40 days after maize emergence, 100 kg ha⁻¹ of nitrogen fertilizer was applied as stipulated by Cantarella et al. (2022). One week after the application of sludge, the hybrid Agroceres 1015 maize was sown with the mechanical distribution of eight to nine seeds per linear meter and with spacing of 0,80 cm between rows and when the seedlings were about 20 cm tall, thinning was performed, leaving five to seven plants per linear meter. Two central rows were left in each plot to be used to collect the plants to determine the grain yield of the corn crop.

To evaluate the maize yield, the cobs of 10 plants located within the useful plot were randomly collected at 100 days after

sowing. Later the cobs were placed in a forced ventilation (Universal – mod 449L) oven at 65 °C, until reaching constant weight and weighed to obtain the dry mass of the grains. The productivity was estimated by extrapolating the dry mass data of the grains from the area occupied by the ten plants to one hectare.

During the development of the maize cultivation, two applications of herbicide (atrazine) were made to control the invasive plants and two preventive applications of fungicide (pyraclostrobin + epoxiconazole) were made to avoid leaf diseases.

The results were statistically evaluated by analysis of variance and the effects of the treatments were tested using the F test. When statistical significance was achieved, means were compared using the Tukey test, with a probability of error of 5%. The data was analyzed by the software "SAS for Windows" (SAS, 2002)

RESULTS AND DISCUSSION 3

The results of maize grain yield estimated in kg ha⁻¹ are presented in Figure 2, it can be observed that the grain yield varied significantly with the mineral fertilization (ADM) and the doses of malt sludge (24, 48 and 72 Mg ha⁻¹) applied to the soil, when compared with the plots

without fertilization. The lowest values of grain yield were verified in the soil without malt sludge and the highest values in the treatments with mineral fertilization and the doses of sludge. The grain yields obtained with the doses of 24, 48 and 72 Mg ha⁻¹ of sludge were higher than the

value observed in the plot with mineral fertilization recommended for corn culture.

The comparison between the grain yield value obtained by mineral fertilization and the treatments of 24, 48 and 72 Mg ha⁻¹ of malt sludge showed an increase of 18,67%, 28,00% and 40,66%, respectively, in the corn grain production. The results concerning the production suggest that the application of doses above 24 Mg ha⁻¹ of sludge were efficient to replace the mineral fertilization recommended to meet the needs of the maize crop. This trend in the production of maize grains, observed with the sludge of malteria, are in agreement with the results of several authors in works with sewage sludge in which they verified a higher grain yield with doses between 15 and 30 Mg ha⁻¹ of sludge on a dry basis (Bremm et al., 2012; Gonçalves et al., 2019).

Furthermore, in Figure 2 it is observed that the grain yield provided by the application of 24 Mg ha⁻¹ of sludge was 3,940

kg ha⁻¹, with 48 Mg ha⁻¹ was 4,250 kg ha⁻¹ and with 72 Mg ha⁻¹ was 4,670 kg ha⁻¹, these yield values were close and above the national average, which according to Souza et al. (2018) is 4,178 kg ha⁻¹. Chances are that this difference of almost a tonne in grain yield between the national average and mineral fertilisation may be related to any climatic, soil and metabolic factors not identified in this study, which may have acted during the development of the maize and altered the availability, absorption and translocation of the nutrients provided by mineral fertilisation. By converting the 3,3 Mg ha⁻¹ grain yield with the amounts of nitrogen, P₂O₅ and K₂O supplied to the maize, it can be seen that of the 120 kg of N ha⁻¹ the maize absorbed 66 kg of N ha⁻¹, of the 50 kg of P₂O₅ ha⁻¹, 33 kg of P₂O₅ kg ha⁻¹ was absorbed and of the 30 kg of K₂O ha⁻¹, an average of 13,20 kg of K₂O ha⁻¹ was exported to the grain, i.e. the nutrients were not absorbed in their entirety to provide a grain yield of around 4.178 kg ha⁻¹ (Sousa and Lobato, 2004; Coelho, 2006).

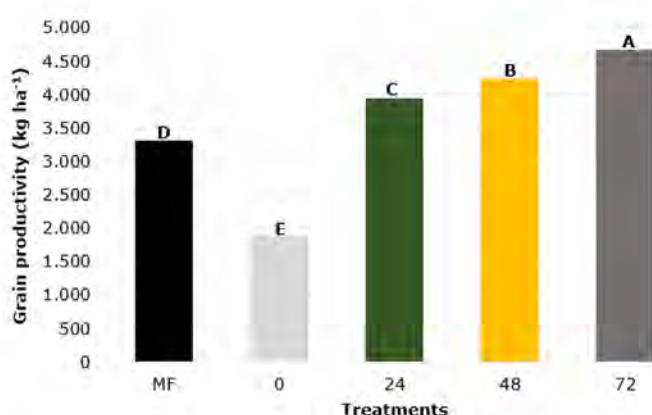


Figure 2. The production of maize grains determined in the plots with mineral fertilization (MF), without sludge (0 Mg ha⁻¹) and with malt sludge at doses of 24, 48 and 72 Mg ha⁻¹. (Averages followed by the same lower-case letter does not differ [p > 0,05] by Tukey test)

Source: Authors.

The values of maize grain yield obtained is probably due to the contribution of nutrients provided by the doses applied to the soil, because the addition of 24, 48 and 72 Mg ha⁻¹ provided about 120, 240 and 360 kg ha⁻¹ of total nitrogen, respectively.

In Table 2 are presented the results of the chemical composition of the soil without the addition of sludge (0 Mg ha⁻¹) and with applications of mineral fertilization and doses of sludge in the amounts of 24, 48 and 72 Mg ha⁻¹, it should be emphasized that dolomitic limestone was applied and incorporated in the soil of all treatments, so the values of pH and base saturation

(V%) are higher and the potential acidity ($H^+ + Al^{+3}$) is lower in the soil without the application of sludge (0 Mg ha⁻¹). It is verified that the addition of doses of malt sludge presented significant differences in the values of pH, phosphorus, potential acidity ($H^+ + Al^{+3}$) and base saturation (V%) when compared with the values determined in the soil of the plots without the application of sludge and with mineral fertilization and the values of organic matter, potassium, magnesium and cation exchange capacity (CEC) showed no significant difference between treatments.

Table 2. Chemical characteristics of a dystrophic Yellow Red Latosol 120 days after fertilization with mineral fertilizer and sewage sludge doses

Tratamen- tos	pH (CaCl ₂)	MO (g.dm ⁻³)	P (mg dm ⁻³)	K	Ca	Mg	H +Al ⁺³ (mmolc dm ⁻³)	SB	CEC	V (%)
0 Mg ha ⁻¹	5,6a	14,2a	25,7c	3,7a	29,7a	14,5a	20,5b	47,8a	68,0a	70,2a
Ad. Mineral	5,4ab	13,5a	26,7b	3,5a	28,2b	13,7a	23,2b	45,7a	68,9a	65,5ab
24 Mg ha ⁻¹	5,2abc	13,5a	42,0bc	3,3a	20,7bc	10,5a	29,0ab	34,5b	63,5a	54,5b
48 Mg ha ⁻¹	5,0bc	12,7a	55,0b	3,1a	17,7c	9,2a	29,7ab	31,4b	61,1a	51,2b
72 Mg ha ⁻¹	4,9c	12,5a	94,0a	2,8a	17,7c	10,7a	34,0a	38,8b	72,0a	51,7b
CV (%)	4,35	8,76	15,08	13,66	15,49	20,39	15,79	19,29	12,73	11,08

*Means followed by the same lowercase letter in the column do not differ [p > 0,05] by Tukey test.

Source: Authors.

It is worth highlighting that the organic matter content did not show significant increases in the plots with doses of malting sludge, chance because the time between incorporating the sludge and collecting the soil to determine the organic matter was only 120 days. Therefore, it is a short period of time to see a significant change in the organic matter content of the soil (Table 2). In this respect, Boeira et al. (2009) report that although sewage sludge has a relatively high organic carbon content, there is a significant consumption of organic matter in the soil soon after its application, until a new balance of the C/N ratio in the soil is reached. This is because organic residues added to the soil with a C/N ratio lower than 15:1, such as the malting sludge (C/N = 6.9:1) used in this study, tend to favour microorganisms in the processes of nitrogen mineralisation and immobilisation of the soil's native organic carbon and lead to a depletion in organic matter content (Fontaine et al., 2003). This tendency for the soil's organic matter to be consumed with the doses of sludge may explain the fact that the 48 Mg ha⁻¹ and 72 Mg ha⁻¹ plots showed organic matter levels with no significant variation between treatments, but with values lower than those observed in the plot with no sludge added.provide grain yields of around 4.178 kg ha⁻¹ (Sousa and Lobato, 2004; Coelho, 2006).

When comparing the results of Table 2 with the limits stipulated by Technical Bulletin n° 100 of the Agronomic Institute of Campinas (IAC) it is possible to see that the pH values of the soil in the

plots that received the doses of sludge are varying within the range classified as medium acidity, the phosphorus contents for annual crops are in the high to very high range and the base saturation values are oscillating within the range classified as medium (Cantarella et al., 2022).

In contrast, the potassium levels measured in the soils with the application of the sludge doses did not show significant differences in relation to the treatments without sludge and with mineral fertilization, this behavior of potassium after the application of sludge to the soil has been observed by several authors who claim that the low concentration of potassium in the chemical composition of sewage sludge is associated with the high solubility of potassium with water (Andreoli et al., 2014; Nobile et al., 2014; Gonçalves et al., 2019).

In Table 2, it is observed a tendency of pH reduction as the application exceeds the dose of 24 Mg ha⁻¹ of sludge. Similar results were also verified by Boeira and Souza (2007) with cumulative application of 17 Mg ha⁻¹ of sewage sludge and by Trannin et al. (2008) with 12 Mg ha⁻¹. These authors state that soil acidification may be associated with the process of mineralization of ammoniacal nitrogen existing in the sludge composition and that after coming into contact with nitrifying microorganisms, they transform NH⁺⁴ into NO⁻³ and release hydrogen into the soil solution. Furthermore, there are also oxidation reactions of the organic fraction that promote the dissociation of protons

linked to the COOH and OH functional groups of organic matter and compounds containing sulfides that result in the release of CO₂, organic acids, and hydrogen into the soil (Boeira and Souza, 2007; Boeira and Maximiliano, 2009).

The hydrogen ion released by the decomposition of the sludge may have solubilized the aluminum oxides and thus raised the H⁺Al⁺³ and reduced the calcium and magnesium levels in the soil (Table 2) and consequently reduced the values of base saturation, because the H⁺Al⁺³ promote the neutralization of cations Ca⁺², Mg⁺ and K⁺, in the negative charges of colloids in the soil (Bonini et al., 2015). The decrease in soil pH corroborates the data obtained with the base saturation (V%) that were lower in the treatments with doses of malt sludge and mineral fertilization, explained by the replacement of exchangeable bases (Ca⁺², Mg⁺ and K⁺) by H and Al⁺³ ions in the soil exchange sites.

When analyzing in Table 2 the phosphorus contents in the soils with application of the doses of malt sludge, the highest value of phosphorus was verified in the plot with the dose of 72 Mg ha⁻¹ of sludge, followed by the plots that received the doses of 48 and 24 Mg ha⁻¹ of sludge. The phosphorus contents determined in the soil for maize plants were considered very high (94 mg dm⁻³) for 72 Mg ha⁻¹ of sludge, high (55 mg dm⁻³) for 48 Mg ha⁻¹ of sludge and high (42 mg dm⁻³) for 24 Mg ha⁻¹ of sludge (Cantarella et al., 2022).

In this regard several authors have reported substantial increases in soil phosphorus contents when they used sewage sludge doses between 30 and 60 Mg ha⁻¹ as a source of nutrients for agricultural crops (Bonini et al., 2015; Carvalho et al., 2015; Knopik et al., 2018). Alves and Souza (2008) found that this significant increase in soil phosphorus arising from the application of sewage sludge doses was related to the amounts of phosphorus added by the mass of sludge applied to the soil. In this present study, the amounts of phosphorus provided by the 24, 48 and 72 Mg ha⁻¹ doses of sludge were not enough to cause the increases observed in the soil, as these doses provided an average of around 0,23, 0,47 and 0,70 kg of phosphorus ha⁻¹, respectively. Chances are that the high phosphorus levels in the soil are related to the solubilisation of insoluble phosphates in the soil, which were solubilised by the release of organic acids during the decomposition of the sludge in the soil, and to the H⁺ ions resulting from the mineralisation of ammoniacal nitrogen. These organic acids and H⁺ promote the dissolution of water-insoluble phosphates by the action of carbonic acids and by reducing the binding energy of phosphorus fixed in the soil, resulting in the formation of phospho-humic complexes and organic phosphates that increase the availability of phosphorus in the soil (Lobo et al., 2013; Costa et al., 2014).

4 CONCLUSIONS

The sludge presented levels of heavy metals and number of Thermotolerant coliforms and *Salmonella* sp compatible with the limits considered as adequate by the Brazilian legislation to be used as organic fertilizer. The application of the sludge caused a reduction in soil pH, which favored the formation of phosphate-humic complexes and organic phosphates that increased the availability

of phosphorus in the soil. The sludge doses increased the corn grain yield and the smallest dose (24 Mg ha^{-1}) provided a higher yield than that obtained with mineral fertilization recommended for corn culture. Malt sludge at a dose of 24 Mg ha^{-1} can be safely used in agricultural areas, as it presented agronomic quality favourable to the cultivation of maize.

AUTHORSHIPS CONTRIBUTION

All authors have contributed in various ways to the development, execution, and conclusion of the project. **Paulo Fortes Neto:** Development, bibliography's revision , methodology, research, data analysis, writing and editing.

Nara Lúcia Perondi Fortes: Methodology, research, data tabulation and analyses, review and editing. **Lucilene Carvalho Silva:** Methodology, oversight of financial and administrative resources.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors acknowledge the collaborative partnership established between the Foundation for Support to Research, Technology, and Innovation

(FAPETI) of the University of Taubaté and the company Malteria Soufflet Brasil Ltda. to make the project (Process nº 27611/2022) possible.

REFERENCES ■

Abreu-Junior, C.H., Brossi, M.J.L., Monteiro, R.T., Cardoso, P.H.S., Mandu, T.S., Nogueira, T.A.R., Ganga, A., Filzmoser, P., Oliveira, F.C., Firme, L.P., He, Z. and Capra, G.F. (2019). Effects of sewage sludge application on unferile tropical soils evaluated by multiple approaches: A field experiment in a commercial Eucalyptus plantation. *Science of The Total Environment*, 655, 1457-1467. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.334>

Alves, M. C., and Souza, Z. M. (2008). Recuperação de área degradada por construção de hidroelétrica com adubação verde e corretivo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32, 2505-2516. <https://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832008000600027>

Andreoli, C. V., Von Sperling, M., and Fernandes, F. (2014). *Lodo de esgoto: tratamento e disposição final*. Editora UFMG.

Baioui, R., Ghnaya, T., Wali, M., Zaier, H., Ghabriché, R., Mnashi, M., Lutts, S., Zonig, W., and Abdelly, C. (2017). Agricultural valorization of domestic sewage sludge: Impact on growth, photosynthesis, nutrition, and toxic metal accumulation in *Medicago sativa*. *Agrochimica*, 61(1), 56-74. <http://dx.doi.org/10.12871/00021857201645>

Barbosa, G.M.C., Tavares Filho, J., Brito, O.R., and Fonseca, I.C.B. (2007). Efeito residual do lodo de esgoto na produtividade do milho safrinha. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 31, 601-605. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832007000300020>

Bernadete, C. (2021). *Emissão de gases de efeito estufa na disposição final de lodo de esgoto*. [Dissertação (Mestrado)-Instituto Agronômico de Campinas]. Campinas. https://www.iac.sp.gov.br/areadoinstituto/posgraduacao/repositorio/storage/teses_dissertacoes/pb247618.pdf

Bittencourt, S., Aisse, M.M., and Serrat, B.M. (2017). Gestão do uso agrícola do lodo de esgoto: estudo de caso do estado do Paraná, Brasil. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 22(6), 1129-1139. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522017156260>

Boeria, R.C., and Souza, M.D. (2007). Estoques de carbono orgânico e de nitrogênio, pH e densidade de um latossolo após três aplicações de lodo de esgoto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 31, 581-590. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832007000300018>

Boeria, R.C., and Maximiliano, V.C.B. (2009). Mineralização de compostos

nitrogenados de lodos de esgoto na quinta aplicação em Latossolo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 33, 711-722. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000300023>

Boeria, R.C., Ligo, M.A.V., and Maximiliano, V.C.B. (2009). Emissão de C-CO₂ em amostras de Latossolo tratadas com lodos de esgoto. IN: EMBRAPA. Meio Ambiente, Jaguariúna. *Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento*, 53, 1-20. <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/513733>

Bonini, C.S.B., Alves, M.C., and Montanari, R. (2015). Lodo de esgoto e adubação mineral na recuperação de atributos químicos de solo degradado. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 19(4), 388-393. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n4p388-393>

Bremm, R.R.R., Damasceno, S.G., Secco, D., Vilas Boas, M.A.; Torres, D.G.B., Meess, J.B.R., and Kummer, L. (2012). Potencial de uso de lodo de esgoto na cultura do milho em latossolo argiloso no oeste do Paraná. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, 23, 17-24. https://www.rbciamb.com.br/Publicacoes_RBCIAMB/article/view/328

Bueno, J.R.P., Berton, R.S., Silveira, A.P.D., Chiba, M.K., Andrade, C.A., and De Maria, I.C. (2011). Chemical and microbial attributes of an oxisol treated with successive applications of sewage sludge. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*, 35, 1461-1470. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000400040>

Carvalho, C.S., Ribeirinho, V.S., Andrade, C.A., Grutzmacher, P., and Pires, A.M.M. (2015) Composição Química da Matéria Orgânica de Lodos de Esgoto. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, 10(3), 413-419. <http://dx.doi.org/10.5039/agraria.v10i3a5174>

Cantarella, H., Quaggio, J.A., Matos Júnior, D., Boaretto, R.M., and Raij, B.V. (2022). Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo. (Boletim Técnico, no 100) (3^a ed.). Instituto Agronômico de Campinas (IAC).

Cerón, A.R.M., González, A.R., and Guzmán, J.M.G. (2017). Manejo de biosólidos y su posible aplicación al suelo, caso Colombia y Uruguay. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 8(1), 217-226. <https://doi.org/10.22490/21456453.1851>

Coelho, A.M. (2006). Nutrição e Adubação do Milho. In: EMBRAPA. *Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo. Sete Lagoas: EMBRAPA-CNPMS, Circular Técnica n° 78*, p. 1-10. http://www.cnpms.embrapa.br/publicacoes/publica/2006/circular/Circ_78.pdf

Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. (2021). *Aplicação de lodo de sistemas de tratamento biológico de efluentes líquidos sanitários em solo - diretrizes e critérios para projeto e operação* (Norma Técnica P.4230/2021) (2^a ed.). CETESB. <https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/2021/09/>

P4.230_APLICACAO-DE-LODO-DE-SISTEMA-DE-TRATAMENTO-BIOLÓGICO-DE-EFLuentes-liquidaos-sanitarios-em-solo-diretrizes-e-criterios-para-projeto-e-operacao-2a-Edicao-Maio-2021.pdf

Coscione, A.R., Silva, L.F.M., De Maria, I.C., Andrade, C.A., and Ferracini, V.L. (2014). Solução do solo e análise de componentes principais para monitoramento da aplicação de lodo de esgoto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 38, 1654-1662. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000500030>

Costa, V.L., Maria, I.C., Camargo, O.A., Grego, C.R., and Melo, L.C.A. (2014). Distribuição espacial de fósforo em Latossolo tratado com lodo de esgoto e adubação mineral. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 18(30), 287-293. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662014000300007>

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. (2004). Manual de segurança e qualidade para a cultura do milho. Brasília. DF. Embrapa/Sede, 78 p. (Qualidade e Segurança dos Alimentos). Projeto PAS Campo. Convênio CNI/SENAI/SEBRAE/EMBRAPA <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/111875>

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. (2006). Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. (2^a ed). Embrapa Solos. <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/93143/1/>

sistema-brasileiro-de-classificacao-dos-solos2006.pdf

Fisch, G. (1995). Caracterização climática e balanço hídrico em Taubaté (SP). *Revista Biociências*, 1(1), 81-90.

Fontaine, S., Mariotti, A., and Abbadie, L. (2003). The priming effect of organic matter: a question of microbial competition? *Soil Biology Biochemical*, 35, 837-43. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(03\)00123-8](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(03)00123-8)

Gonçalves, A.A., Moreira, C.R., Souza, G.B.P., Peres, D.M., and Canzi, G.M. (2019). Adubação com lodo de esgoto na cultura do milho. *Revista Técnico-Científica do CREA-PR - Ed. Especial*, 1-13. <https://revistatecie.crea-pr.org.br/index.php/revista/article/view/535/319>

Ippolito, J.A., Ducey, T.F., Diaz, K., and Barbaricjk, K.A. (2021) Long-term bio-solids land application influences soil health, *Science of The Total Environment*, 791, 148344-148378. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148344>

IUSS Working Group WRB. (2015). *World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015 International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*. (World Soil Resources Reports, 106). FAO. <https://www.fao.org/3/i3794en/I3794en.pdf>

Knopik, M.A., Rufine, R., Bittencourt, S., and Gasparotto, F. (2018). Apporte de nutrientes em solos tratados com lodo de esgoto: estudo de caso da região de

- Campo Mourão, Noroeste do Paraná. *Revista Brasileira de Planejamento e Desenvolvimento*, 7(3), 379-389. <https://doi.org/10.3895/rbpd.v7n3.8597>
- Lobo, T. F., Filho, H. G., Bull, L. T., Kummer, A. C. B., and Souza, F. L. P. de. (2019). Desenvolvimento e nutrição do girassol com lodo de esgoto e nitrogênio. *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente*, 12(1), 173-193. <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2019v12n1p173-193>
- Miranda, R.B. (2013). *Proposta de uso benéfico do resíduo do tratamento de efluentes de uma cervejaria de Lages/SC*. [Trabalho de conclusão de curso]. Universidade Tecnológica Federal do Paraná-UTFPR. https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/6824/2/CM-COEM_2012_2_21.pdf
- Muzzolon, E., Melati, J., Luchetta, L., Bravo, C.E.C., and Tonial, I.B. (2021). Processamento da cevada para produção de malte: parâmetros de qualidade. In: Verruck, S. Avanços em Ciência e Tecnologia de Alimentos (pp.205-225). Editora Científica. <https://doi.org/10.37885/210203295>
- Nobile, F.D., Nunes, H.D., and Neves, J.C. (2014). Doses de lodo de esgoto sobre o desenvolvimento da grama Bermudas (*Cynodon dactylon*). *Nucleus*, 11(2), 271-281. <https://doi.org/10.3738/1982.2278.1046>
- Pereira, N.G.F., Frazão, L.A., Oliveira, A.L.G., Cardoso, P.H.S., Sampaio, R.A., and Fernandes, L.A. (2015). Efeitos da aplicação de lodo de esgoto estabilizado por diferentes processos nos atributos químicos e microbiológicos de um Cambissolo Háplico. *Cadernos de Ciência & Tecnologia*, 32(1/2), 115-127. <https://dx.doi.org/10.35977/0104-1096.cct2015.v32.23307>
- Pires, A.M.M., Andrade, C.A., Souza, N.A.P., Carmo, J.B., Coscione, A.R., and Carvalho, C.S. (2015). Disponibilidade e mineralização do nitrogênio após aplicações sucessivas de lodo de esgoto no solo, estimadas por meio de incubação anaeróbica. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 50(4), 333-342. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2015000400009>
- Raij, B. van., Andrade, J. C., Cantarella, H., and Quaggio, J. A. (2001) *Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais*. (Manual Técnico) (1^a ed.). Instituto Agronômico http://lab.iac.sp.gov.br/Publicacao/Raij_et_al_2001_Metod_Anal_IAC.pdf
- Software Statistical Analysis System SAS. (2002). *Procedures guides. Version 6*. Cary [Estados Unidos]: SAS by SAS INSTITUTE-Inc. Cary, NC, USA.
- Sousa, D.M.G., and Lobato, E. (2004). Adubação com nitrogênio. In: Sousa, D.M.G., Lobato, E (Ed). *Cerrado: Correção do solo adubação* (pp. 129-145). Planaltina: Embrapa Cerrados. <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/info-teca/handle/doc/555355>
- Souza, A., dos Reis, J., Raymundo, J., and Pinto, R. (2018). Estudo da produção

do milho no Brasil. *South American Development Society Journal*, 4(11), 182-194. <https://doi.org/10.24325/issn.2446-5763.v4i11p182-194>

Stehouwer, R. C., Wolf, A.M., and Doty, W. (2000). Chemical monitoring of sewage sludge in Pennsylvania, variability, and application uncertainty. *Journal Environmental Quality*, 29, 1686-1695. <https://doi.org/10.2134/jeq2000.00472425002900050041x>

Trannin, I.C.B., Siqueira, J.O., and Moreira, F.M.S. (2008). Atributos quími-

cos e físicos de um solo tratado com biossólido industrial e cultivado com milho. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 12, 223-230. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662008000300001>

Yada, M.M., Melo, W.J., and Melo, V.P. (2020). Elementos-traço no solo, na planta e no grão de plantas de milho cultivadas em latossolos tratados com lodo de esgoto por 16 anos. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 25(2), 371-379. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522020150124>

Conflictos de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.



Licencia de Creative Commons

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



Fecha de recibido: 18-09-2023

Fecha de aceptado: 26-02-2024

DOI: 10.22490/21456453.7196

DINÁMICA ESPACIOTEMPORAL DE LA CONTAMINACIÓN POR MICROPLÁSTICOS EN SEDIMENTOS MARINOS DE LA BAHÍA DE TUMACO, PACÍFICO COLOMBIANO

SPATIAL-TEMPORAL DYNAMICS OF MICROPLASTIC CONTAMINATION IN MARINE SEDIMENTS OF TUMACO BAY, PACIFIC COLOMBIAN PACIFIC

Sofía Martínez Martínez ¹

Andrés Molina Sandoval ²

Guillermo Duque Nivia ³

¹ Ingeniera Ambiental, Grupo de investigación Ecología y Contaminación Acuática,
Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira, Colombia.

<https://orcid.org/0009-0003-1435-8388> somartinezm@unal.edu.co

² Investigador posdoctoral, Grupo de investigación Ecología y Contaminación Acuática, Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira, Colombia.

<https://orcid.org/0000-0003-1954-4393> aemolinas@unal.edu.co

³ Profesor Titular, Facultad de Ingeniería y Administración,
Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira, Colombia.
<https://orcid.org/0000-0002-2468-529X> duquen@unal.edu.co

Citación: Martínez, S., Molina, A. y Duque, G. (2024). Dinámica espaciotemporal de la contaminación por microplásticos en sedimentos marinos de la Bahía de Tumaco, Pacífico colombiano. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 15(2), 311-332.

<https://doi.org/10.22490/21456453.7196>

■ RESUMEN

Contextualización: la Bahía de Tumaco en el Pacífico Colombiano es potencialmente receptora de residuos domésticos, lo que lleva a que diferentes contaminantes como los Microplásticos (<5mm) se acumulen en los sedimentos marinos.

Vacío de conocimiento: en la Bahía de Tumaco, Pacífico colombiano no se ha investigado sobre contaminación de MP en sedimentos marinos.

Propósito: el propósito de este estudio fue identificar la presencia, características y variación espaciotemporal de la contaminación por Microplásticos (MP) durante los años 2020 y 2021 en la zona interna y externa de la Bahía de Tumaco, y si ello tuvo alguna relación con la cercanía a la zona costera, la desembocadura de los ríos y el COVID-19.

Metodología: Se recolectaron muestras de MP en la zona interna y externa de la Bahía de Tumaco, durante las épocas de lluvia y seca en los años 2020 y 2021.

Resultados y conclusiones: la contaminación por MP fue mayor en la zona interna ($721,37 \pm 175,96$ partículas/kg). Así mismo; la época de lluvia presentó la mayor contaminación por MP ($928,73 \pm 220,20$ partículas/kg) mientras que la menor se observó en la época seca ($440,78 \pm 101,54$ partículas/kg). Finalmente, se evidenció una disminución de MP de un año a otro, siendo marzo durante la época de lluvia de 2020, el que presentó la mayor contaminación con un promedio de $1543,55 \pm 362,92$ partículas/kg, este patrón se debe posiblemente a la disminución del turismo en la Bahía de Tumaco por la emergencia sanitaria que comenzó en Colombia a mediados de marzo del año 2020 y que se presentó a nivel mundial.

Palabras clave: contaminación costera, época climática, estuario tropical, microplástico, pandemia

ABSTRACT

Contextualization: Tumaco Bay in the Colombian Pacific is potentially a recipient of domestic waste, which leads to different contaminants such as microplastics (< 5mm) accumulating in marine sediments.

Knowledge gap: In the Tumaco Bay in Colombian Pacific, it has not been researching the patterns of microplastic contamination in marine sediments.

Purpose: The purpose of this study was to identify the presence, characteristics, and spatiotemporal variation of microplastic (MP) contamination during the years 2020 and 2021 in the internal and external zone of Tumaco Bay and whether this had any relationship with the proximity to the coastal zone, river mouths and COVID-19.

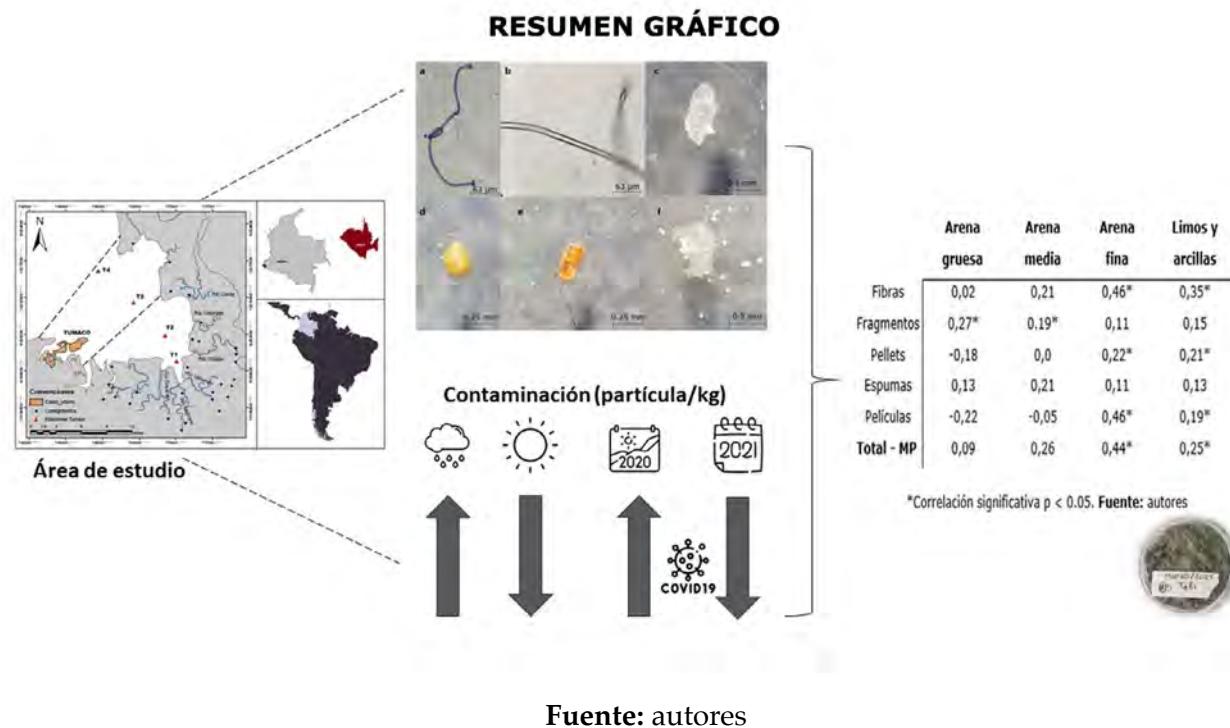
Methodology: MP samples were collected in the internal and external zone

of Tumaco Bay, during the rainy and dry seasons in the years 2020 and 2021.

Results and conclusions: MP contamination was higher in the internal zone ($721,37 \pm 175,96$ particles/kg). Likewise, the rainy season presented the highest contamination by microplastics ($928,73 \pm 220,20$ particles/kg) while the lowest was observed in the dry season ($440,78 \pm 101,54$ particles/kg). Finally, there was a decrease in MP from one year to another, being March during the rainy season of 2020, the one that presented the highest contamination with an average of $1543,55 \pm 362,92$ particles/kg, this pattern is possibly due to the decrease of tourism in the Bay of Tumaco due to the sanitary emergency that began in middle of March 2020 in Colombia and that occurred worldwide.

Keywords: coastal pollution, microplastic, pandemic, tropical estuary, weather season

■ RESUMEN GRÁFICO



1 INTRODUCCIÓN

El plástico es un término que abarca una amplia gama de materiales a base de polímeros que se caracterizan por tener diferentes propiedades, resultado de su mezcla con diferentes aditivos para mejorar su rendimiento, según los requerimientos del producto final (Lusher *et al.*, 2019). Existen varios tipos de plástico, pero la mayor parte de la producción mundial se basa en cinco de ellos, que

son: cloruro de polivinilo (PVC), nailon y tereftalato de polietileno (PET), los cuales son más propensos a hundirse, y polietileno (PE) polipropileno (PP) y poliestireno (PS), que son más propensos a flotar (Auta *et al.*, 2017). Aquellos MP propensos a hundirse tienden a acumularse en los sedimentos, puesto que su densidad es superior a la del agua de mar.

Los plásticos presentan una alta variedad de colores, formas y tamaños. Según su tamaño pueden clasificarse en mega ($>1\text{m}$), macro (2,5 cm-1m), meso (5mm-2,5 cm), micro (1 μm -5 mm) y nano plásticos ($<1\text{ }\mu\text{m}$) (Franco *et al.*, 2017). Los MP (MP) pueden clasificarse como primarios o secundarios, de acuerdo con su origen; aquellos que son primarios corresponden a los que se originan en las actividades de fabricación industrial y pueden hallarse en artículos de limpieza del hogar, juguetes, polvos de limpieza industrial y productos de higiene y cuidado personal como limpiadores faciales, crema dental, polvos de maquillaje, etc. (Delvalle *et al.*, 2020). Los MP secundarios son aquellos que se generan de la fragmentación de restos de plásticos de mayor tamaño, provocado por la acción de agentes externos tales como radiación solar, el oleaje, la oxidación y la biodegradación; estos suelen tener forma de fragmentos, películas, fibras y espumas (Garcés *et al.*, 2021).

Los factores antropogénicos pueden provocar la acumulación de desechos plásticos y debido a los factores naturales se presenta la formación de MP (Prarat *et al.*, 2020). Se estima que en las zonas marinas entre un 60 y 90% de la basura corresponde a plásticos, esto por el inadecuado manejo y disposición directa de residuos a los cuerpos de agua naturales, que finalmente desembocan sus aguas en el mar; dicha contaminación es causada por actividades como extracción de minerales, acuicultura, transporte marítimo, entre otras, (Franco *et al.*, 2017). Lo anterior provoca que los residuos se acumulen en el

sedimento de ambientes costeros, marinos y oceánicos. Los sedimentos marinos tienen un gran potencial para acumular MP y han demostrado ser sumideros de estos por largo tiempo, llegando a representar el 3,3% del peso de los sedimentos en playas muy contaminadas (Auta *et al.*, 2017).

En Colombia, gran parte de los asentamientos humanos se encuentran en zonas cercanas a ríos, ciénagas y al mar. Se calcula que el 65% de los residuos sólidos y el 100% de las aguas residuales domésticas generadas en las poblaciones aledañas a las costas tiene un manejo inadecuado y son vertidas a los cuerpos de agua naturales, causando contaminación por plástico en los ecosistemas acuáticos (Garcés *et al.*, 2021). Actualmente, el país cuenta con pocos estudios sobre MP en sedimentos marinos.

En un estudio realizado en la Ciénaga Grande de Santa Marta se encontraron concentraciones de MP en sedimentos de manglar que oscilaron entre las 31 y 2.863 partículas/kg, de los cuales las películas constituyeron la forma más común de partículas de MP (Garcés *et al.*, 2019). En lo que respecta a la zona del Pacífico, en la Bahía de Buenaventura se encontró entre los años 2015 y 2019 concentraciones de MP que oscilaron entre las 11 a 1.354 partículas/kg, de las cuales las fibras fueron la forma más frecuente y se estimó un incremento del 84.4% en la acumulación de MP en sedimentos durante dichos años (Vásquez *et al.*, 2020). Tanto en la región Caribe como Pacífica se han encontrado MP de

origen secundario, pero la contaminación por ellos es mayor en el Caribe, posiblemente por diferencias en sus condiciones geográficas, dinámicasmareales, densidad poblacional e intensidad de las actividades económicas, que influyen en la acumulación y distribución de los MP (Franco *et al.*, 2017). Así mismo, las poblaciones de las zonas costeras del Pacífico están en constante aumento, generando preocupación puesto que su desarrollo y crecimiento pueden llegar a intensificar la contaminación por MP (Cartillo y Garcés, 2018).

Actualmente la comunidad científica expresa preocupación por el hecho de que los organismos que ingieren residuos plásticos puedan estar expuestos a contaminantes absorbidos, puesto que se ha encontrado que los plásticos constituyen un sumidero y una fuente de contaminantes químicos como los contaminantes orgánicos persistentes (COP) (Falahudin *et al.*, 2020). Lo anterior, sumado a los aditivos que se usan en su fabricación, pueden causar una afectación toxicológica al filtrarse desde los plásticos al medio ambiente marino (Falahudin *et al.*, 2020; Masura *et al.*, 2015). Esto puede provocar que organismos como crustáceos, anélidos, algas y peces tengan una interacción o absorción

directa de los aditivos que se encuentran en las partículas de MP presentes en los sedimentos marinos, proporcionando un mecanismo para el transporte de contaminantes en la red trófica (Lusher *et al.*, 2019).

La Bahía de Tumaco en el Pacífico Colombiano es potencialmente receptora de residuos domésticos, puesto que recibe aguas residuales sin tratamiento de la población de Tumaco (Guzmán *et al.*, 2014). Por lo tanto, la presencia de contaminación por plástico puede ser alta y con variaciones en las concentraciones de MP en sedimentos de acuerdo con la época y la zona (Bastidas *et al.*, 2008). Se podría esperar que la concentración por MP sea mayor en la época de lluvia, con una tendencia a aumentar conforme se disminuye la distancia a la desembocadura de los ríos y la costa. Además, la forma de MP más encontrada en sedimentos son las fibras, por lo que se espera que este tipo de microplástico sea el más abundante (Falahudin *et al.*, 2020; Peng *et al.*, 2017; Vianello *et al.*, 2013). El objetivo de esta investigación es identificar la presencia, características y variación espaciotemporal de la contaminación por MP durante los años 2020 y 2021 en la Bahía de Tumaco, Nariño.

MATERIALES Y MÉTODOS 2

ÁREA DE ESTUDIO

La Bahía de Tumaco se encuentra ubicada en el extremo sur de la costa Pacífica colombiana, en el departamento de Nariño, se constituye como la mayor entrante del litoral nacional ($1^{\circ} 45'$ y $2^{\circ} 00'$ N $78^{\circ} 30'$ y $78^{\circ} 45'$ O) y comprende un área aproximadamente de 350 Km^2 , con profundidades que varían entre 0 y 50 m (Rodríguez, 2011). El borde de la costa de la Bahía comprende el municipio de Tumaco con 138091 habitantes y parte del municipio de Francisco Pizarro con 7.434 habitantes, en ellos se destacan las poblaciones de Salahonda y las islas de El Morro, Tumaco y La Viciosa (Censo Nacional de Población y Vivienda, 2018). El régimen de lluvias es moderado y presenta una

precipitación promedio anual de 2647.1 mm, en la Bahía predomina la marea tipo semidiurna registrando dos mareas altas y dos mareas bajas por día, con un periodo de aproximadamente 12,5 horas (Garay *et al.*, 2006). Sus habitantes basan su economía en labores extractivas como la pesca y actividades portuarias (Guzmán *et al.*, 2014). El ecosistema estuarino de la Bahía recibe las aguas de diferentes ríos, que se caracterizan por ser de cauce corto pero caudalosos y, de igual forma, las aguas de origen oceánico que se dirigen hacia la costa; todo esto genera variabilidad permanente de las condiciones fisicoquímicas que pueden cambiar de acuerdo con el ciclo mareal y las épocas secas y de lluvia (Bastidas *et al.*, 2008) (Figura 1).

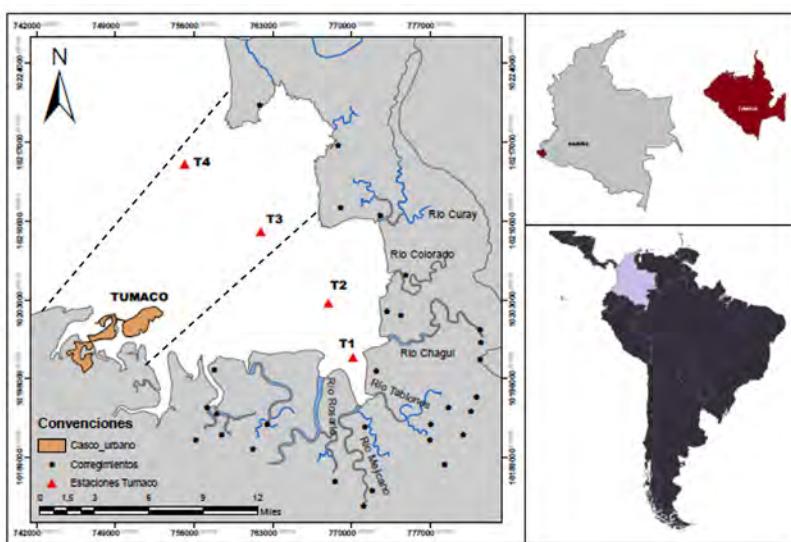


Figura 1. Bahía de Tumaco en el Pacífico colombiano: área de estudio y zona de muestreo. La convención de los triángulos representa los sitios de muestreo, siendo T1 y T2 la zona interna y T3 y T4 la zona externa de la Bahía

Fuente: autores

Diseño muestral y recolección de muestras

Los sitios de muestro se distribuyeron de acuerdo con el gradiente de salinidad en zona interna y externa y se colectaron muestras durante la época de lluvia (marzo-febrero) y la época seca (octubre-noviembre) de los años 2020 y 2021. Las estaciones ubicadas en la zona interna del estuario (T1 y T2) correspondieron a aquellas áreas donde existe una mayor influencia de los ríos (Rosario, Mejicano, Tablones, Curay, Chaquey y Colorado) y mayor cercanía a los centros poblados. Las estaciones localizadas en la zona externa de la Bahía (T2 y T3) se caracterizaron por tener mayor influencia marina y mayor salinidad. Se colectaron 48 muestras de sedimentos marinos usando un core de 4.5 cm de diámetro y 20 cm de longitud, a una profundidad de 3.36 ± 0.30 m (promedio \pm error estándar), en cuatro sitios de muestreo en la Bahía de Tumaco; de las muestras de sedimentos (tres réplicas) fueron extraídos los primeros 5 cm, los cuales se almacenaron y refrigeraron para el posterior análisis en el laboratorio.

Preparación de los sedimentos

La contaminación de las muestras es un problema importante en los trabajos de laboratorio de MP, por ello, se tomaron varias medidas para evitar la contaminación ambiental. En el laboratorio se procedió a una limpieza a fondo de los lugares de trabajo y del equipo que se utilizaría antes de cualquier trabajo. El vidrio y el

metal se utilizaron preferiblemente en lugar de plástico (Barrett *et al.*, 2020). Los materiales y muestras se cubrieron con papel de aluminio limpio para minimizar el riesgo de exposición. Por último, durante el análisis de los sedimentos sólo se encontraron en el laboratorio las personas imprescindibles, utilizando batas de algodón para minimizar la introducción de cualquier fibra transportada por la ropa o el aire en las muestras de sedimentos (Delvalle *et al.*, 2020).

La separación de los MP se llevó a cabo mediante la adaptación de diferentes metodologías sobre separación por densidad (Cartillo y Garcés, 2018; Delvalle *et al.*, 2020; Vásquez *et al.*, 2020). Las muestras de sedimento se depositaron en cajas de Petri y se secaron en un horno Memmet 30-750 a una temperatura de 70°C, con el fin de disminuir el posible daño de las estructuras químicas en algunos tipos de polímeros (Cordova *et al.*, 2021), por un periodo de 48 horas para eliminar toda la humedad del sustrato. Posterior a esto las muestras completamente secas se pesaron en una balanza analítica Adam SPB 723 de precisión $\pm 0,0001$ g, y se registró el peso seco de la muestra para el posterior análisis de los resultados.

En la separación de los MP por densidad, se utilizó una solución salina saturada compuesta por 365 g de cloruro de sodio (NaCl) en un litro de agua destilada, con el fin de lograr una densidad aproximadamente 1.2 g/ml. Para lograr una correcta disolución, se agitó a 1000 rpm y a una temperatura de 60°C (esto con el

fin de aumentar la solubilidad del agua) durante 10 minutos en una plancha con agitador Heidolph PT1000 medium; posteriormente se filtró en un tamiz metálico de 125 µm y de 63 µm para eliminar cualquier tipo de partículas de sal de tamaños superiores que no se hubiese disuelto totalmente; seguidamente, las muestras secas se depositaron en beakers, a los cuales se les adicionó la solución salina y se agitó a 600 rpm por 10 minutos. En lugar de esperar varias horas, normalmente propuesto para la sedimentación natural de la solución, la muestra se depositó en un Cono Imhoff de 1 L de capacidad y después de 30 minutos de separación por densidad, se extrajo el material sobrenadante, aproximadamente 50 ml (que contiene MP y material vegetal) en beakers y se filtró dos veces en un tamiz de 63 µm, este tiempo es suficiente para lograr una separación significativa de MP en función de su densidad (Vásquez *et al.*, 2020); adicional a esto, se secó nuevamente en el horno a 70°C durante 48 horas y se pesó nuevamente para determinar la masa de sólidos total.

Debido a la presencia de materia orgánica como fragmentos de madera, algas secas y hojas, en las muestras del sobrenadante, estas se oxidaron mediante el uso de hipoclorito de sodio (NaClO) al 15%. Se añadió 20 ml de hipoclorito a cada muestra con los sólidos recolectados y se dejó oxidando por 48 horas en las cajas de Petri. Finalizado el tiempo de oxidación, se limpió el material resultante (MP) usando abundante agua destilada y tamizando dos veces en un tamiz de

63 µm, dicho material fue depositado en un recipiente y se secó nuevamente a una temperatura de 70°C por 48 h, posterior a esto se determinó el peso seco de los MP.

Las muestras se analizaron en un estereoscópico y un microscopio para la identificación, conteo, medición y clasificación de los MP, teniendo en cuenta que no presentaran estructura orgánica o celular, que tuvieran un color homogéneo; para el caso de las fibras que no estuvieran ramificadas y no presentaran segmentos (Falahudin *et al.*, 2020; Kovač *et al.*, 2016). Para evitar una identificación errónea de los MP se tuvo en cuenta que las partículas presentaran un color homogéneo no brillante y las fibras no estuvieran ramificadas, también se llevaron a cabo pruebas de resistencia térmica para corroborar si lo identificado como MP correspondía a contaminantes plásticos, los cuales al entrar en contacto con el calor se derriten mientras que estructuras celulares y orgánicas no lo hacen. Las unidades se expresaron en partículas/kg.

Análisis estadístico

Los datos de abundancia de MP en el sedimento se expresaron como la media ± error estándar (EE). Para determinar las diferencias significativas se realizaron Análisis de Varianza Multivariado Permutacional (PERMANOVA), con 9999 permutaciones, aceptando un valor $p<0.05$ como una diferencia estadísticamente significativa. Así mismo, se realizaron análisis Pair-Wise Test (pruebas post

hoc) para identificar grupos significativamente diferentes entre las épocas y zonas de estudio (Anderson, 2017). Se realizó un análisis de porcentaje de similitud (SIMPER) con índice de distancia euclidiana y a dos vías, para evaluar similitudes entre tipos de MP, zonas de estudio y épocas de los años 2020 y 2021 (Clarke and Warwick,

1994; Vásquez *et al.*, 2020). Por último se realizaron correlaciones de Spearman mediante el programa PAST 4.0 para identificar la relación de proporcionalidad directa o inversa entre el tamaño de grano de sedimentos y la abundancia de MP en la Bahía de Tumaco (Rendón-Von Osten *et al.*, 2023).

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

RESULTADOS

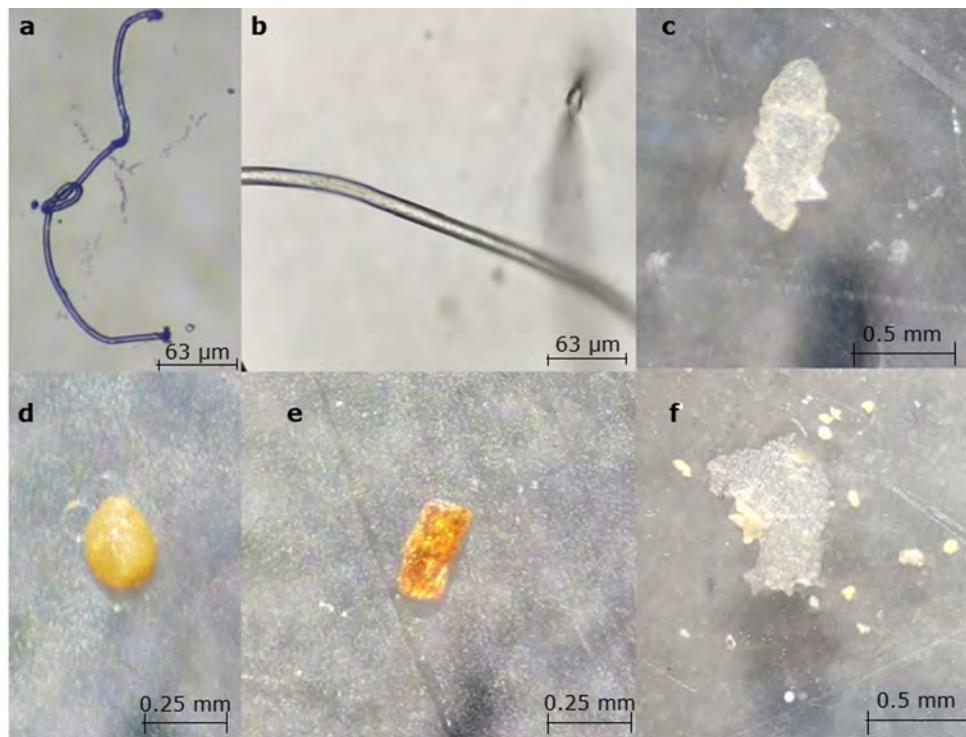


Figura 2. Tipos de MP en el sedimento marino de la Bahía de Tumaco:
a. fibra, b. fibra vista en el microscopio a 40X, c. película, d. pellet,
e. fragmento y f. espuma

Fuente: autores

Para el estuario en general se registró un promedio de $684,76 \pm 125,11$ partículas/kg, los tipos de MP encontrados por este estudio fueron fibras, fragmentos, pellets, espumas y películas (Figura 2), donde el tipo de MP más común encontrado en toda la Bahía de Tumaco fueron las fibras, seguidas de los fragmentos. El tamaño de todas las partículas se ubicó en un rango desde las $63 \mu\text{m}$ hasta los 3mm y el color predominante fue el transparente para las fibras, película, pellet y espumas, y amarillo para los fragmentos. Las fibras aportaron las mayores contribuciones a la diferencia en la acumulación de MP entre la época de lluvia y la época seca (74,25%, SIMPER) y continuaron aportando en la diferencia de distribución de un año a otro (78,21%, SIMPER).

Por otra parte, la época de lluvia presentó las mayores concentraciones de MP en la Bahía de Tumaco, con un promedio de $928,73 \pm 220,20$ partículas/kg (promedio \pm error estándar) mientras que la época seca contó solamente con $440,78 \pm 101,54$ partículas/kg (Tabla 1). Contrastando con lo anterior la zona interna presentó mayores concentraciones de MP que la externa siendo respectivamente $721,37 \pm 175,96$ y $648,15 \pm 181,37$ partículas/kg.

Durante el año 2020 los muestreos realizados presentaron dos etapas; la primera correspondió al muestreo realizado en el mes de marzo (época de lluvia en Tumaco), durante este mes empezó el confinamiento por la emergencia sanitaria en Colombia; la segunda corresponde al mes de octubre (época seca en Tumaco) y tiempo en el cual el turismo había disminuido en gran parte.

De acuerdo con lo anterior, se presentaron diferencias significativas ($p < 0.05$) del total de MP entre épocas, presentándose las mayores concentraciones en la época de lluvia con $1543,55 \pm 362,92$ partículas/kg y las menores en época seca con $725,52 \pm 162,86$ partículas/kg, (Tabla 1).

A pesar de que no se presentaron diferencias significativas entre zonas, la zona externa ($1159,23 \pm 297,20$ partículas/kg) presentó mayores concentraciones de MP que la zona interna ($1109,85 \pm 316,57$ partículas/kg) en la Bahía de Tumaco. Así mismo, solo las fibras presentaron diferencias significativas entre las épocas del año de estudio, como se muestra en la Tabla 1.

Con respecto al año 2021 se presentaron diferencias significativas del total de MP entre las zonas del estuario (Tabla 1), las mayores concentraciones de MP fueron en la zona interna, con una densidad de $332,88 \pm 42,72$ partículas/kg. En lo concerniente a las épocas no se presentaron diferencias significativas; sin embargo, la época de lluvia presentó mayores concentraciones de MP ($313,91 \pm 48,24$ partículas/kg) que la época seca ($156,03 \pm 43,02$ partículas/kg).

■ Tabla 1. Densidad de MP por épocas y zonas de estuario para el año 2020 y 2021 según su clasificación (Promedio ± EE). Los resultados de la prueba permanova pair-wise test se representan con letras [p(PERM)<0,05]

AÑO		FIBRA	FRAGMENTO	PELLET	ESPUMA	PELÍCULA	Total de MP
2020	ÉPOCA	lluvia seca	1381,54 ± 321,85 a 575,05 ± 159,96 b	72,89 ± 22,43 84,20 ± 23,47	11,06 ± 4,98 20,27 ± 9,28	50,96 ± 28,59 44,19 ± 19,06	18,08 ± 8,59 1,82 ± 1,82
	ZONAS	Interna Externa	911,89 ± 210,10 1044,70 ± 271,62	110,99 ± 26,66 46,09 ± 12,56	5,87 ± 4,10 25,45 ± 8,97	72,36 ± 27,37 22,79 ± 17,96	4,32 ± 4,32 15,58 ± 8,05
	ÉPOCA	lluvia seca	246,91 ± 41,73 113,36 ± 36,19	54,91 ± 18,08 30,86 ± 12,28	1,90 ± 1,90 3,96 ± 2,67	10,19 ± 4,49 7,85 ± 4,44	0,00 0,00
	ZONAS	Interna Externa	248,60 ± 41,85 111,67 ± 35,47	68,86 ± 18,50 16,91 ± 6,25	3,96 ± 2,67 1,90 ± 1,90	11,46 ± 5,17 6,59 ± 3,50	0,00 0,00
Promedios	Promedio 2020	978,30 ± 194,83 a		78,55 ± 15,92		15,67 ± 5,24	
	Promedio 2021	180,13 ± 30,39 b		42,87 ± 10,98		2,93 ± 1,62	
						9,02 ± 3,10	
						0,00 b	
						234,97 ± 35,64 b	

Fuente: autores

Al comparar los años 2020 y 2021, tanto el total de las fibras como las películas presentaron diferencias significativas ($p < 0,05$) de un año a otro, presentándose en el año 2020 las mayores concentraciones de estas partículas (Tabla 1); seguidamente se identificaron diferencias significativas en la contaminación por MP entre las zonas y épocas de los años de estudio (Figura 3), presentándose mayor contaminación en la época de lluvia de 2020 (1543,55 ± 362,92 partículas/kg) y en la zona externa del mismo año (1159,23 ± 297,2 partículas/kg).

La densidad promedio de MP para el año 2020 correspondió a 1134,54 ± 212,4

partículas/kg mientras que para el año 2021 fue de 234,97 ± 35,64 partículas/kg en la Bahía de Tumaco, presentándose diferencias significativas entre los dos años (Tabla 1). El año 2020 fue el año de mayor contaminación y la época de lluvia fue la más contaminada, contrastando con lo anterior la época seca presentó la mitad de la concentración de microplásticos que la época de lluvia de los años de estudio. Al iniciar el período de confinamiento, se observa una tendencia hacia la disminución de las concentraciones de MP desde la época de seca del 2020 (725,52 ± 162,86 partículas/kg) hasta la época seca de 2021 (156,03 ± 43,02 partículas/kg) como se muestra en la Figura 3.

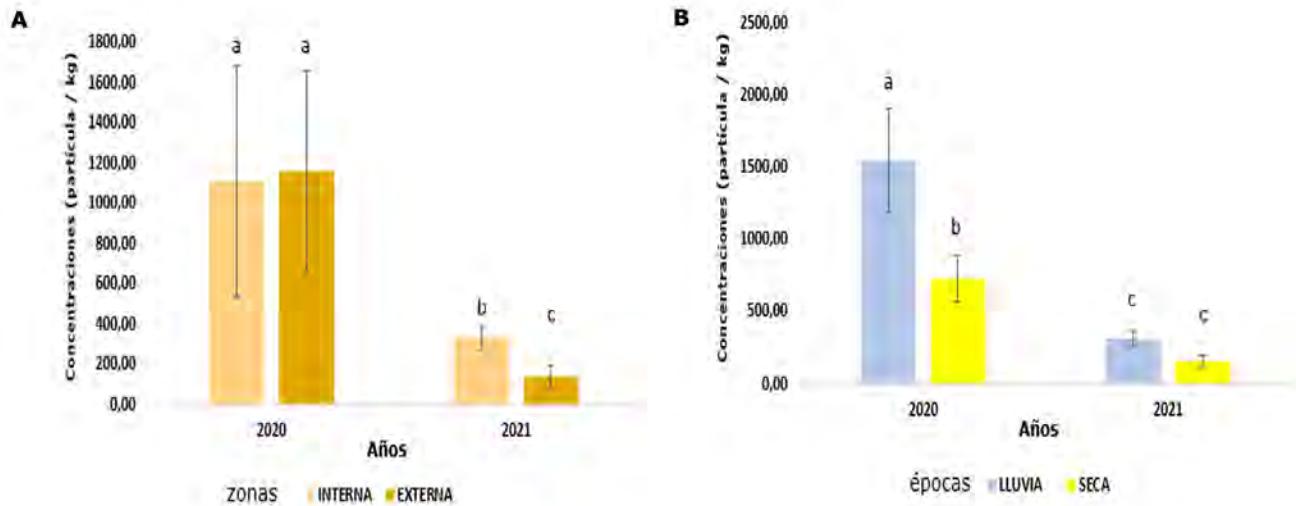


Figura 3. Concentraciones de MP totales (Promedio \pm EE). A) zonas versus años; B) épocas versus años. Los resultados de la prueba permanova pair-wise test se representan con letras [p(PERM)<0.05]

Fuente: autores

Para finalizar, el resultado entre el tamaño de grano de sedimentos (μm) y la abundancia de MP en general en la Bahía de Tumaco mostró una correlación significativa de los MP totales con los limos, arcillas y arena fina. Seguidamente las

fibras, las películas y los pellets presentaron una correlación positiva fuerte con la arena fina y los limos y arcillas, mientras que los fragmentos presentaron una correlación positiva fuerte con la arena gruesa y media (Tabla 2).

■ Tabla 2. Correlación de Spearman entre la abundancia de MP con las características de los sedimentos marinos de la Bahía de Tumaco, en el Pacífico colombiano

	Arena gruesa	Arena media	Arena fina	Limos y arcillas
Fibras	0,02	0,21	0,46*	0,35*
Fragmentos	0,27*	0,19*	0,11	0,15
Pellets	-0,18	0,0	0,22*	0,21*
Espumas	0,13	0,21	0,11	0,13
Películas	-0,22	-0,05	0,46*	0,19*
Total - MP	0,09	0,26	0,44*	0,25*

*Correlación significativa $p < 0.05$. Fuente: autores

DISCUSIÓN

El tipo de MP más común en la Bahía de Tumaco fueron las de fibras, esto coincide con lo reportado en varios estudios del Pacífico Colombiano (Tafur *et al.*, 2021; Vásquez *et al.*, 2020), ya que aportaron las mayores contribuciones en la diferencia de acumulación de MP de una época a otra y de un año a otro siendo 74,25 % y 78,21% respectivamente. Lo anterior, está acorde con lo encontrado en el sistema estuarino de la Bahía de Vitória en el sureste de Brasil, donde las fibras comprendieron el 77% de los MP registrados (Baptista *et al.*, 2019). De igual forma, las fibras fueron abundantes en los sedimentos del estuario de Buenaventura con un 63,7 y 56,03% del total de MP (Vásquez *et al.*, 2020), en la Bahía de Changjiang, China, con 93% de la abundancia total (Peng *et al.*, 2017) y con el 45% de dominancia de fibras en sedimentos del Océano Pacífico occidental (Zhang *et al.*, 2020).

Los altos contenidos de fibras en los sedimentos se deben posiblemente a la fragmentación de las redes de pesca, actividad que ha sido identificada como una fuente importante de contaminación de plástico en el Pacífico (Richardson *et al.*, 2017). Las redes están hechas principalmente de polietileno y poliamida (Baptista *et al.*, 2019; Peng *et al.*, 2017), estos polímeros oscilan entre densidades de 970 kg/m³ (0,97 g/ml) y 1160 kg/m³ (1,16 g/ml) respectivamente (Franco *et al.*, 2017; Masura *et al.*, 2015). Las fibras de poliamida sedimentan mucho más rápido al tener una

densidad mayor que la del agua de mar (1027 kg/m³ o 1,027 g/ml), mientras que las partículas de polietileno y poliestireno se sedimentan posiblemente por la acción de microorganismos que están asociados a las superficies de los MP como restos de diatomeas, esporas de hongos y principalmente bacterias, los cuales han sido encontrados en la mayoría de sedimentos marinos (Baptista *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2020), que posiblemente provocan cambios en la densidad y flotabilidad de los MP aumentando las concentraciones en los sedimentos.

En la Bahía de Tumaco se presentaron mayores concentraciones de MP en la época de lluvia, posiblemente porque hubo un mayor arrastre de macro y microplásticos por el aumento de la escorrentía, que introduce residuos plásticos depositados en playas, quebradas y ríos al estuario; este resultado concuerda con lo encontrado en la Bahía de Buenaventura durante los años 2015 y 2019 (Vásquez *et al.*, 2020). Durante la época de lluvia predomina la humedad atmosférica que contiene tres factores, precipitación, humedad relativa y presión de vapor. La humedad y velocidad del viento son factores importantes que afectan a la distribución diaria de la contaminación por partículas y los MP también son partículas, por lo que dichas condiciones pueden tener una gran influencia en su distribución (Jia *et al.*, 2022); por lo anterior, al presentarse precipitaciones en la época de lluvia y mayor humedad existe mayor deposición atmosférica de los MP en la Bahía.

La distribución de MP puede verse afectada por las olas, las mareas y las corrientes de agua a lo largo de la costa (Franco *et al.*, 2017; Peng *et al.*, 2017), un estudio realizado en el estuario del río Támesis en el Reino Unido encontró que la distribución de MP estaba influenciada por las mareas y las corrientes de agua, situación que posiblemente se presenta en la Bahía de Tumaco (Browne *et al.*, 2011). La zona interna presentó las mayores concentraciones de MP, lo cual se debe probablemente a la cercanía con los centros poblados y a la marea, puesto que cuando se presenta marea alta el agua que sale de los ríos no se distribuye muy lejos de la desembocadura de los mismos, debido a la fuerza del agua que viene entrando hacia la Bahía con la marea, provocando que las partículas se acumulen en la zona más aledaña a los centros poblados y a la costa (Franco *et al.*, 2017; Garay *et al.*, 2006). Sumado a lo anterior, la descarga de las aguas residuales por parte de la población de Tumaco y Francisco Pizarro puede explicar la alta densidad de MP en la zona interna de la Bahía.

El promedio de partículas de MP para el año 2020 (1134.54 ± 212.40 partículas/kg) fue similar a lo encontrado en la laguna de Venecia en Italia, donde estimaron 1445 partículas/kg (Vianello *et al.*, 2013) y mayor a lo encontrado en sedimentos de la Bahía de Banten en Indonesia, con una concentración promedio de MP 267 ± 98 partículas/kg (Falahudin *et al.*, 2020). Con respecto al año 2021 las concentraciones de MP (234.97 ± 35.64 partículas/kg) fueron similares a las reportadas en el estua-

rio de Haihe en China (216.1 ± 92.1 partículas/kg) y mayor a lo reportado en el estuario Yondingxinhe en China con una concentración promedio de MP 85.0 ± 40.1 partículas/kg (Wu *et al.*, 2019).

Se evidenció una disminución de MP de un año a otro, esto se debe posiblemente a la disminución del turismo en la Bahía de Tumaco por la emergencia sanitaria que se presentó a nivel mundial, además el año 2020 fue el año de mayor contaminación y la época de lluvia fue la más contaminada, puesto que correspondía a un periodo de tiempo prepandemia donde el turismo y las actividades cotidianas en la Bahía estaban muy normalizadas. De hecho, estudios realizados en diferentes partes del mundo han documentado una reducción en la contaminación ambiental durante los confinamientos y cierres de actividades económicas (Sharma *et al.*, 2021; Tobías *et al.*, 2021). Sin embargo, a pesar de la disminución, las concentraciones siguen siendo significativamente altas y preocupantes para la salud de los ecosistemas marinos y la salud humana.

Esta tendencia es diferente con las observadas en estudios anteriores en otras zonas marinas como el mar de Chukchi, donde no se presentó una disminución de un año a otro, sino que por el contrario hubo un incremento del 0,78 al 0,91 (Fang *et al.*, 2022). Posiblemente con el paso de los años las concentraciones de MP en la Bahía de Tumaco aumenten debido a que el confinamiento terminó y ocurra lo sucedido en el Giro Subtropical del Pacífico Norte donde la abundancia de MP ha

aumentado en dos órdenes de magnitud en las últimas cuatro décadas (Goldstein *et al.*, 2012), y se estima que la concentraciones de MP se cuadruplicará de aquí a 2060 aproximadamente a 30°N en el Pacífico, mientras que podría duplicarse en 2050 o multiplicarse por 50 entre 2010 y 2100 en el océano global (Isobe *et al.*, 2019; Lebreton *et al.*, 2017).

Las características de los sedimentos como el tamaño de partícula (μm) desempeñan un papel importante en la distribución y acumulación de los MP en el fondo marino (Vermaire *et al.*, 2017); por esta razón en este estudio se realizó un análisis de correlación entre estos factores y se descubrió que la abundancia de MP se correlacionaba positivamente con la arena fina, limos y arcillas ($p < 0,05$), esta condición indica que la abundancia de los MP aumenta a medida que disminuye el tamaño de partículas del sedimento (Falahudin *et al.*, 2020).

Finalmente, las altas concentraciones de MP en la época de lluvia y en la zona interna en la Bahía de Tumaco, exponen la necesidad de ampliar los enfoques integrados para estudiar eficazmente la contaminación marina por plásticos y emprender acciones eficaces para limitar la entrada de plásticos, sobre todo fibras, en el medio marino (Fagiano *et al.*, 2023). En lo que concierne a la acumulación y transformación de este agente contaminante dentro de los ecosistemas marinos, surge la posibilidad de que dicha acumulación genere procesos de ingestión, bioacumulación y manifestación de efectos tóxicos en los diferentes organismos que los conforman. Por ello, es importante mejorar los procedimientos de gestión de residuos sólidos y permitir que el estuario continúe brindando sus servicios ambientales (Vidal *et al.*, 2021) así como regulación de desequilibrios y perturbaciones, reciclaje de nutrientes, entre otros.

4 CONCLUSIONES

En lo que respecta a la distribución espacial, el estuario interno presentó las mayores cantidades de MP en la época de lluvia, lo cual se pudo originar muy probablemente por la cercanía a desembocaduras de los ríos, a los centros poblados, por la escorrentía y por el vertimiento de aguas residuales no tratadas por parte de la población Tumaco. Los MP dominantes

correspondieron a fibras, condición que se puede atribuir a las actividades pesqueras que se llevan a cabo en la región de estudio. La disminución de las concentraciones de los MP totales de un año a otro se debió posiblemente a la disminución del turismo en la Bahía de Tumaco por la emergencia sanitaria que se presentó a nivel mundial. Esto demuestra que es

importante crear un turismo sostenible y consciente para disminuir la contaminación, evitando que sea la única solución que se genere una pandemia, para así lograr que la Bahía no presente altas con-

centraciones de plásticos y MP. Es posible que se transfieran grandes cantidades de pequeños MP en los tejidos y a través de la red alimentaria planctónica, lo que debería ser el foco de la investigación futura.

CONTRIBUCIÓN DE LA AUTORÍA ■

Sofía Martínez-Martínez: toma y procesamiento de muestras, análisis de datos, conceptualización, consulta bibliográfica, escritura, borrador original y edición. **Andrés Molina Sandoval:** conceptualización, metodología, muestreo,

investigación, análisis de datos, adquisición de recursos, escritura, revisión y edición. **Guillermo Duque Nivia:** conceptualización, muestreo, análisis de datos, adquisición de recursos, administrador del proyecto, logística, revisión y edición.

AGRADECIMIENTOS ■

A la Universidad Nacional de Colombia sede Palmira; al grupo de investigación en Ecología y contaminación acuática y al proyecto “Evaluación de la biodiversidad y la dinámica ecosistémica

para determinar prioridades de conservación y sustentabilidad de la pesca artesanal en la Bahía de Tumaco, Nariño”, código 65500 financiado por el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación.

LITERATURA CITADA ■

Anderson, M. J. (2017). Permutational Multivariate Analysis of Variance (PERMANOVA). Wiley StatsRef: Sta-

tistics Reference Online. <https://doi.org/10.1002/9781118445112.STAT07841>

- Auta, H. S., Emenike, C. U., and Fauziah, S. H. (2017). Distribution and importance of microplastics in the marine environmentA review of the sources, fate, effects, and potential solutions. *Environment International*, 102, 165–176. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.02.013>
- Baptista, J. A., Gaylarde, C., Beech, I., Bastos, A. C., da Silva Quaresma, V., and de Carvalho, D. G. (2019). Microplastics and attached microorganisms in sediments of the Vitória Bay estuarine system in SE Brazil. *Ocean and Coastal Management*, 169(September 2018), 247–253. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2018.12.030>
- Barrett, J., Chase, Z., Zhang, J., Holl, M. M. B., Willis, K., Williams, A., Hardisty, B. D., and Wilcox, C. (2020). Microplastic Pollution in Deep-Sea Sediments From the Great Australian Bight. *Frontiers in Marine Science*, 7. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.576170>
- Bastidas, G. D., Casanova, R. F. y Celis, C. N. (2008). Correlación de parámetros fisicoquímicos con la dinámica en la Bahía de Tumaco. *Boletín Científico CCCP*, 15(15), 83–89. https://doi.org/10.26640/01213423.15.83_89
- Browne, M. A., Dissanayake, A., Galloway, T. S., Lowe, D. M., and Thompson, R. C. (2011). Ingested microscopic plastic translocates to the circulatory system of the mussel, *Mytilus edulis* (L.). *Environmental science and technology*, 45(21), 9304-9310. <https://doi.org/10.1021/es201811s>
- Cartillo, V. y Garcés, O. (2018). *Metodología para el muestreo y análisis de micróplasticos en aguas superficiales y sedimentos de manglar*. www.invemar.org.co
- Clarke, K., and Warwick, R. M. (1994). Change in marine communities. An approach to statistical analysis and interpretation. *Natural Environment Research Council*, 1–172.
- Cordova, M. R., Ulumuddin, Y. I., Purbonegoro, T., and Shiromoto, A. (2021). Characterization of microplastics in mangrove sediment of Muara Angke Wildlife Reserve, Indonesia. *Marine Pollution Bulletin*, 163, 112012. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112012>
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (DANE).(2018). *Censo Nacional de Población y Vivienda*. DANE. <https://sitios.dane.gov.co/cnpy/#/>
- Delvalle, D., Fábrega Duque, J., Olmos, J., Garcés-Ordóñez, O., Amaral, S. S. G. do, Vezone, M., de Sá Felizardo, J. P., and Meigikos dos Anjos, R. (2020). Distribution of Plastic Debris in the Pacific and Caribbean Beaches of Panama. *Air, Soil and Water Research*, 13. <https://doi.org/10.1177/1178622120920268>
- Fagiano, V., Compa, M., Alomar, C., Ríos-Fuster, B., Morató, M., Capó, X., and Deudero, S. (2023). Breaking the paradigm: Marine sediments hold two-fold microplastics than sea surface waters and are dominated by fibers. *Science of the Total Environment*, 858, 159722. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159722>

Falahudin, D., Cordova, M., Xiaoxia Yogoaswara, D., Wulandari, I., Hindarti, D., and Arifin, Z. (2020). The first occurrence, spatial distribution and characteristics of microplastic particles in sediments from Banten Bay, Indonesia. *Science of the Total Environment*, 705, 135304. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135304>

Fang, C., Zhang, Y., Zheng, R., Hong, F., Zhang, M., Zhang, R., Mou, J., Mu, J., Lin, L., and Bo, J. (2022). Spatio-temporal variation of microplastic pollution in the sediment from the Chukchi Sea over five years. *Science of the Total Environment*, 806, 150530. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150530>

Franco, J. C., Martínez, M. F. y Rojas, J. A. (2017). *Formulación de lineamientos, medidas de conservación, manejo y uso de ecosistemas marinos y costeros, con la intención de apoyar acciones de fortalecimiento en la gestión ambiental de las zonas costeras de Colombia*. Invemar. www.invemar.org.co

Garay, J., Gómez, D. y Ortíz, J. (2006). *Diagnóstico integral biofísico y socioeconómico realtivo al impacto de las fuentes de contaminación terrestre en la Bahía de Tumaco, Colombia y lineamientos básicos para un plan de manejo*. <https://aquadocs.org/handle/1834/14704>

Garcés, O., Castillo-Olaya, V. A., Granados-Briceño, A. F., Blandón García, L. M., and Espinosa Díaz, L. F. (2019). Marine litter and microplastic pollution on mangrove soils of the Ciénaga Grande

de Santa Marta, Colombian Caribbean. *Marine Pollution Bulletin*, 145(2), 455–462. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.06.058>

Garcés, O., Espinosa, L. F., Costa Muniz, M., Salles Pereira, L. B., and Meigikos dos Anjos, R. (2021). Abundance, distribution, and characteristics of microplastics in coastal surface waters of the Colombian Caribbean and Pacific. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(32), 43431–43442. <https://doi.org/10.1007/S11356-021-13723-X>

Goldstein, M. C., Rosenberg, M., and Cheng, L. (2012). Increased oceanic microplastic debris enhances oviposition in an endemic pelagic insect. *Biology Letters*, 8(5), 817–820. <https://doi.org/10.1098/RSBL.2012.0298>

Guzmán, Á. , Zambrano, M. M., Casanova-Rosero, R. F., Selvaraj, J. J. y Martínez, A. (2014). La condición ecológica de la Bahía de Tumaco (Pacífico colombiano): evaluación de la calidad del agua y del fitoplancton. *Boletín Científico CIOH*, 32, 3–16. <https://doi.org/10.26640/22159045.260>

Isobe, A., Iwasaki, S., Uchida, K., and Tokai, T. (2019). Abundance of non-conservative microplastics in the upper ocean from 1957 to 2066. *Nature Communications*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-019-08316-9>

Jia, Q., Duan, Y., Han, X., Sun, X., Munyanze, J., Ma, J., and Xiu, G. (2022). Atmospheric deposition of microplastics in the megalopolis (Shanghai) during

- rainy season: Characteristics, influence factors, and source. *Science of the Total Environment*, 847. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157609>
- Kovač, M., Palatinus, A., Koren, Š., Peterlin, M., Horvat, P., and Kržan, A. (2016). Protocol for Microplastics Sampling on the Sea Surface and Sample Analysis. *Journal of visualized experiments: JoVE*, 118, 1–9. <https://doi.org/10.3791/55161>
- Lebreton, L. C. M., Van Der Zwet, J., Damsteeg, J. W., Slat, B., Andradý, A., and Reisser, J. (2017). River plastic emissions to the world's oceans. *Nature Communications*, 8, 15611. <https://doi.org/10.1038/NCOMMS15611>
- Lusher, A., Hollman, P. y Mendoza-Hill, J. (2019). Los MP en los sectores de pesca y acuicultura. ¿Qué sabemos? ¿Deberíamos preocuparnos? FAO. <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/ca3540es>
- Masura, J., Baker, J., Foster, G., Herring, C., and Arthur, C. (2015). *Laboratory Methods for the Analysis of Microplastics in the Marine Environment: Recommendations for quantifying synthetic particles in waters and sediments*. Marinedebris Noaa. <https://repository.oceanbestpractices.org/handle/11329/1076>
- Peng, G., Zhu, B., Yang, D., Su, L., Shi, H., and Li, D. (2017). Microplastics in sediments of the Changjiang Estuary, China. *Environmental Pollution*, 225, 283–290. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.12.064>
- Prarat, P., Thanayotmethi, T., Sriboonyapirat, T., Donsomchit, P., Hongsawat, P., and Chouychai, B. (2020). Preliminary Study of Abundance and Characteristics of Microplastics on Beach Sediment along the Coast of Rayong Province, Thailand. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 581(1), 012033. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/581/1/012033>
- Rendón-Von Osten, J., Benítez-Torres, J. A., Rojas-González, I., Morgado, F., and Borges-Ramírez, M. M. (2023). Microplastics in sediments from the southern Gulf of Mexico: Abundance, distribution, composition, and adhered pollutants. *Science of the Total Environment*, 873, 162290. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162290>
- Richardson, K., Haynes, D., Talouli, A., and Donoghue, M. (2017). Marine pollution originating from purse seine and longline fishing vessel operations in the Western and Central Pacific Ocean, 2003–2015. *Ambio*, 46(2), 190–200. <https://doi.org/10.1007/s13280-016-0811-8>
- Rodríguez, D. E. (2011). Distribution of Enterococci as indicators of fecal contamination in waters of Tumaco Bay, Colombian Pacific Coast. *Revista Cubana de Higiene y Epidemiología*, 50, 2, 136–148. <https://www.medigraphic.com/pdfs/revcubhigepi/chi-2012/chi122b.pdf>
- Sharma, S., Zhang, M., Gao, J., Zhang, H. (2021). Global impact of COVID-19

pandemic on CO₂, CO, and NO₂ emissions: a review. *Environmental Research*, 202, 111905. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111905>

Tafur, D., Molina, A., y Duque, G. (2021). Influencia de las condiciones ambientales en la ecología trófica y presencia de microplásticos en tres especies de lenguados (Pleuronectiformes: Achiridae) en la Bahía de Buenaventura, Pacífico Colombiano. *Revista de Biología Tropical*, 69, 1055-1068. <https://doi.org/10.15517/rbt.v69i3.41922>

Tobías, A., Carnerero, C., Reche, C., Masa-
sagué, J., Via, M., Minguillón, M.C.,
Alastuey, A., Querol, X. (2021). Changes
in air quality during the lockdown in
Barcelona (Spain) one month into the
SARS-CoV-2 epidemic. *Science of the Total
Environment*, 726, 138540. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138540>

Vásquez, D., Molina, A., y Duque, G.
(2020). Distribución espacial y aumento
a través del tiempo de Microplásticos
en sedimentos de la Bahía de Buenaventura,
Pacífico colombiano. *Boletín de Investiga-
ciones Marinas y Costeras*, 50, 27-42. <https://doi.org/10.25268/bimc.invermar.2021.50.1.1021>

Vermaire, J. C., Pomeroy, C., Herczegh, S.
M., Haggart, O., and Murphy, M. (2017).
Microplastic abundance and distribution
in the open water and sediment of

the Ottawa River, Canada, and its tributaries. *FACETS*, 2(1), 301–314. <https://doi.org/10.1139/facets-2016-0070>

Vianello, A., Boldrin, A., Guerriero, P.,
Moschino, V., Rella, R., Sturaro, A., and
Da Ros, L. (2013). Microplastic parti-
cles in sediments of Lagoon of Venice,
Italy: First observations on occurrence,
spatial patterns and identification. *Es-
tuarine, Coastal and Shelf Science*, 130,
54–61. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2013.03.022>

Vidal, L., Molina, A., y Duque, G. (2021).
Incremento de la contaminación por
Microplásticos en aguas superficiales
de la Bahía de Buenaventura, Pacífico
Colombiano. *Boletín de Investigaciones
Marinas y Costeras*, 50, 113-132

Wu, N., Zhang, Y., Zhang, X., Zhao, Z., He,
J., Li, W., Ma, Y., Niu, Z., 2019. Occur-
rence and distribution of microplastics
in the surface water and sediment of
two typical estuaries in Bohai Bay, Chi-
na. *Environmental Science: Processes and
Impacts*, 21(7), 1143–1152. <https://doi.org/10.1039/c9em00148d>

Zhang, D., Liu, X., Huang, W., Li, J., Wang,
C., Zhang, D., and Zhang, C. (2020). Mi-
croplastic pollution in deep-sea sedi-
ments and organisms of the Western
Pacific Ocean. *Environmental Pollution*,
259, 113948. [https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.113948](https://doi.org/10.1016/j.
envpol.2020.113948)



Conflictos de intereses

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



Licencia de Creative Commons

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

ÁREA AGRÍCOLA

Lince, L.A, Sadeghian, S. y Sarmiento, N. (2024). Evaluación de parámetros relacionados con el crecimiento de plantas de café (*Coffea arabica* L.) en respuesta al déficit hídrico del suelo. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 15(2), 11-34. <https://doi.org/10.22490/21456453.6805>

Mora, M., Ochoa, A. y Osorio, V. (2024). Control biológico contra *Fusarium* sp. en plantas de uchuva (*Physalis peruviana* L.) a nivel de invernadero mediante aplicación combinada de *Trichoderma* sp. y *Bacillus* sp. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 15(2), 35-67. <https://doi.org/10.22490/21456453.6789>

Fonseca-López, D., Rodríguez-Molano, C., Vivas-Quilla, N., Almanza-Merchán, P. y Balaguera-López, H. (2024). Análisis de crecimiento del pasto kikuyo *Cenchrus clandestinus* (Hochst. Ex Chiov.) Morrone fertilizado con diferentes niveles de nitrógeno. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 15(2), 69-89. <https://doi.org/10.22490/21456453.6875>

Castillo, J., Polanía, D. y Ardila, J. (2024). Evaluación del rendimiento de arroz (*Oryza sativa* L.) comparando dos métodos de preparación del suelo. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 15(2), 91-112. <https://doi.org/10.22490/21456453.6886>

Valdés, M., Ordoñez, G. y Ortiz, S. (2024). Extracto etéreo en semillas de zapallo (*Cucurbita moschata* Duchesne) en tres generaciones de endocría. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 15(2), 113-129. <https://doi.org/10.22490/21456453.6908>

Jaramillo, E., Tascón, G., Leal, K., Lamus, V., Cabezas, L. y Orejuela, V. (2024). Implementación de atrapanieblas como alternativa de abastecimiento de agua en el municipio de Tuluá. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 15(2), 131-150. <https://doi.org/10.22490/21456453.6740>

Montenegro, S., Calderón, L. y Parra, B. (2024). Inoculantes biológicos: Oportunidades y desafíos para la sustentabilidad agrícola y bioeconomía colombiana. Una revisión. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 15(2), 151-179. <https://doi.org/10.22490/21456453.7018>



ÁREA AMBIENTAL

Díaz-Mesa, M., Hernández, E., Agudelo, D., Villegas, N., Agudelo, G., Herazo, S., Be-rrouet, L., Lozano, L., Espinosa, N., Puerta, Y., Vélez, F., Aguirre, N., Quijano-Abril, M., Rojas-Villa, J., Cardona, D., Salazar, D. y Wills, A. (2024). Caracterización fisicoquímica de la zona de transición acuático terrestre de un humedal tropical (Ayapel-Colombia). *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 15(2), 181-210. <https://doi.org/10.22490/21456453.6681>

Cely, N., Gallardo, R. y Zafra, C. (2024). La gestión de los proyectos constructivos mediante una visión holística de la sostenibilidad. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 15(2), 211-236. <https://doi.org/10.22490/21456453.6719>

Ibarra-Vega, D. y Redondo, J.M. (2024). System Dynamics and Viability Theory for Sustainability assessment, application for bioethanol production in Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 15(2), 237-268. <https://doi.org/10.22490/21456453.6961>

Gómez, A., Feo, J. y Parra, S. (2024). Estimación de analitos del suelo en la altillanura, con teledetección Sentinel-2 y modelos de regresión. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 15(2), 269-289. <https://doi.org/10.22490/21456453.7003>

Neto, P., Fortes, N. y Silva, L. (2024). Mayze yield and changes in the chemical attributes of soil fertilized with malt sludge. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 15(2), 291-309. <https://doi.org/10.22490/21456453.7061>

Martínez, S., Molina, A. y Duque, G. (2024). Dinámica espaciotemporal de la contaminación por microplásticos en sedimentos marinos de la Bahía de Tumaco, Pacífico colombiano. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 12(2), 311-332. <https://doi.org/10.22490/21456453.7196>

INSTRUCCIONES PARA AUTORES ■

La **Revista de Investigación Agraria y Ambiental (RIAA)** es una publicación oficial de la Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente (ECAPMA) de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), destinada a publicar artículos resultado de las investigaciones originales en el área agraria y ambiental y áreas de conocimiento afines.

La Revista de Investigación Agraria y Ambiental (RIAA) y su misión en ser divulgadores de la investigación en áreas agrarias y las otras ciencias involucradas en las que se abarcan en todas las disciplinas dentro de las áreas de las ciencias agrarias y ambientales (OCDE) a través de artículos de artículos de investigación y artículos de revisión resultantes del trabajo de los investigadores nacionales e internacionales.

Proceso de arbitraje de manuscritos.

La recepción formal de artículos se hará única y exclusivamente a través de la plataforma de gestión editorial de la revista, Open Journal System – OJS (<http://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/index>).

Nota: aquellos manuscritos que sean remitidos al correo electrónico no serán considerados para iniciar el proceso editorial.

El equipo de gestión editorial realiza la verificación inicial a los manuscritos postulados y revisa que estén orientados a las temáticas de RIAA y conforme a las normas de la publicación. Aquellos que no cumplan con la lista de chequeo inicial serán devueltos al autor.

Los artículos que acaten los lineamientos editoriales establecidos por la revista iniciarán la fase de asignación de revisores. El equipo editorial seleccionará expertos en el tema para que evalúe el manuscrito bajo la modalidad de doble ciego. Estos expertos serán académicos, especialistas o árbitros ad hoc de reconocida credibilidad en el ámbito nacional y/o internacional. Los revisores dictaminarán sobre originalidad, relevancia, pertinencia y contenido y registrarán su decisión en el Formato para concepto de

evaluación. En caso de obtener evaluaciones positivas, se le notificará al autor para que incorpore dichas observaciones y continúe dentro del proceso editorial.

Una vez adaptado el artículo, el autor deberá remitirlo nuevamente al equipo editorial, dentro de los plazos establecidos para ello, junto con una comunicación especificando las modificaciones efectuadas y cuáles no, indicando los motivos de la negativa. En caso de que un artículo obtenga un concepto favorable y otro desfavorable, será un integrante el comité editorial y/o científico el encargado de dirimir cualquier controversia y cuyo concepto y recomendación editorial será definitiva. Las decisiones del Comité Editorial son inapelables.

Las correcciones ortográficas en el texto son hechas directamente por el equipo editorial de la revista, sin consultar a los autores, además tiene la autonomía de revisar el documento y compararlo con softwares anti-plagio con miras de asegurar la originalidad del manuscrito, luego de este proceso, el comité emitirá observaciones que el autor debe acatar previo a la evaluación por pares. Sin embargo, una versión final antes de impresión y/o publicación en la página web de la RIAA será enviada a los autores para su aprobación. Se considera que la versión final es aceptada si el autor no responde en los tiempos estimados.

La recepción de un manuscrito no obliga a la publicación del mismo. La revisión de los manuscritos se hará respetando el derecho de los autores a la confidencialidad en cuanto a la información, resultados y esfuerzo creativo. Así mismo, se respetará el derecho a la confidencialidad de los revisores y editores.

Política de acceso libre

RIAA proporciona acceso público y gratuito a todo su contenido con el fin de promover un mayor intercambio global del conocimiento y fomentar la lectura y citación de los originales publicados. RIAA no tolera ninguna forma de plagio (total, parcial o conceptual). En caso de

dentificar algún plagio, además de informar al autor el retiro del artículo, buscará advertir a los autores plagiados. RIAA se acoge a lo establecido en la política de plagio de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD).

Periocidad

RIAA es una publicación semestral (enero-junio y julio-diciembre).

Idioma

Los manuscritos enviados pueden estar escritos en español o inglés.

Tipología de manuscritos La RIAA admite las siguientes tipologías de artículos:

Artículo de investigación: se asocia a la divulgación de productos de investigación en sentido estricto. Su estructura debe contar con:

- Introducción
- Materiales Y Métodos
- Resultados y Discusión
- Conclusiones
- Agradecimientos
- Literatura citada

Artículo de revisión: es la sistematización, análisis y balance de lo investigado sobre un problema en particular y tiene por objeto dar cuenta de sus referentes conceptuales, metodológicos y epistemológicos, además de los avances y tendencias del campo investigado. Se caracteriza por presentar una cuidadosa revisión analítica de por lo menos 50 referencias bibliográficas. Un 60% de la literatura citada debe provenir de investigaciones publicadas en los últimos 4 años.

La estructura que se propone es:

- Introducción
- Planteamiento de la temática
- Recuperación Bibliográfica (en forma de tablas, pictogramas, mapas conceptuales entre otros)
- Discusión Ge Oos Kallazgos
- Conclusiones
- Agradecimientos
- Literatura citada

La postulación formal de los artículos de revisión estará sujeta al previo análisis y verificación de la temática y pertinencia del asunto abordado por parte del equipo editorial. En ese sentido, la carta para la solicitud de publicación del artículo de revisión se recibirá de manera inicial a través del correo electrónico de la revista y una vez cuente con el respectivo aval de los editores, se le solicitará al autor realizar envío a través de OJS para el respectivo proceso editorial.

Remisión del manuscrito

Como parte del proceso de envío, los autores están obligados a comprobar que su envío cumpla todos los elementos que se muestran a continuación. Se devolverán a los autores aquellos envíos que no cumplan estas directrices.

La Revista de Investigación Agraria y Ambiental se acoge a la cultura de la originalidad para el desarrollo de la producción intelectual de la institución y por esta razón todos los artículos postulados serán sometidos a verificación con la herramienta Turnitin. En caso que el informe arroje un % de similitud superior al 30% y no derivarse de un trabajo de grado o tesis de postgrado, el equipo editorial tendrá la autonomía de retirar el artículo del proceso editorial.

Lista de comprobación inicial:

1. El manuscrito es inédito, no se ha publicado previamente, ni está siendo postulado simultáneamente a otra publicación.
2. Cumple con los lineamientos establecidos en las Instrucciones para Autores.
3. Se emplea la plantilla diseñada para la presentación de manuscritos.
4. Se han registrado todos los autores en el envío. Este paso es indispensable para evitar retrasos posteriores en el proceso, edición y publicación del artículo.
5. En el apartado "Comentarios para el editor" tendrá la opción de sugerir 3 posibles evaluadores, con su respectivo nombre, afiliación institucional y correo electrónico.
6. Citas y referencias redactadas según estilo APA.
7. Emplea tesauros para la construcción de palabras clave.

Formato general del documento

- Documento en formato Word
- Tamaño de papel carta (21.5 x 27.9 cm) y márgenes 3 cm superior, 2.5 cm izquierda, 3 cm inferior y 2 cm derecha, a una sola columna.
- Tipo de letra Verdana, tamaño 10.
- Espacio interlineal de 1.15 cm.
- Se recomienda que la extensión de los manuscritos postulados para publicación no exceda las 4000 palabras (incluyendo tablas, figuras y literatura citada), y hasta 6000 palabras para los artículos de revisión (incluyendo tablas, figuras y literatura citada).
- Si tiene figuras que ocupen una página completa (dos cuartillas), le recomendamos que lo coloque como anexo al documento. Esta figura quedará enlazada en el espacio web donde se alojará su artículo y en el caso de la versión impresa se maneja con código QR.

Título y autores

El título no debe exceder 15 palabras. Debe describir el contenido del artículo de manera clara y concisa, evitando el uso de palabras ambiguas, abreviaturas y signos de interrogación y exclamación.

Para cada uno de los autores que aparecen en el encabezado se debe proporcionar: nombre completo, último título académico obtenido o estudios actuales, filiación institucional, ciudad y país, correo electrónico. Omita cargos, grados docentes, nombres de grupo de investigación, reconocimientos, etc.

Resumen

El resumen identifica el objetivo y expone de manera breve la metodología, los resultados y las conclusiones del estudio. No deberá exceder las 250 palabras, tampoco incluir citas bibliográficas o abreviaturas, excepto aquellas que sean ampliamente conocidas. Según sea el idioma original del manuscrito deberá incluirlo en un segundo idioma (inglés y español).

Palabras clave

Se sugiere emplear una lista de cuatro a siete palabras, presentadas en orden alfabético y separadas por punto y coma (;).

No repita palabras que se encuentren en el título. Evite el uso de palabras en plural y frases. Idealmente emplee palabras normalizadas o descriptores del tesoro AGROVOC, UNESCO y que sean aceptadas por bases de datos internacionales.

Resumen gráfico

Es una representación concisa y visual de los principales hallazgos de la investigación. Deberá permitir al lector comprender rápidamente la esencia del artículo e incentivar su lectura.

Será requisito que todos los artículos aceptados incluyan esta imagen.

Tablas y figuras

Las tablas deben explicarse por sí solas y no duplican lo planteado en el texto, sino que lo sustituyen o complementan.

Dentro del texto refiérase a la tabla de la siguiente forma, (Tabla 1). Presente los datos en una tabla real sin líneas y columnas, a espacio sencillo, sin divisiones verticales ni divisiones internas. Se deben utilizar unidades del Sistema Internacional (SI). Las abreviaturas y acrónimos deben ser explicados como notas al pie en cada tabla. En ningún caso se admitirán tablas en formato apaisado.

Un ejemplo de la presentación de una tabla es:

Tabla 1. Ejemplo de la presentación de una tabla

Número de la muestra	Nombre	Apellido	Departamento
M1	Milton	Rodríguez	Cundinamarca
M2	Alberto	Ruiz	Cundinamarca
M3	Ricardo	Cadena	Cundinamarca

Fuente de consulta: adaptado de: XXXXX.

Dentro de la categoría de figuras se incluyen gráficos, imágenes, fotos, y cada una de ellas debe tener su correspondiente leyenda y fuente, en caso de ser de su propia autoría mencionarlo. Las abreviaturas y acrónimos deben ser explicados en la leyenda

de la figura. Las figuras deben ser enviadas en formato .jpg .gif o .png y deben tener la calidad necesaria para su publicación (más de 1024pixeles). Un ejemplo de figura:

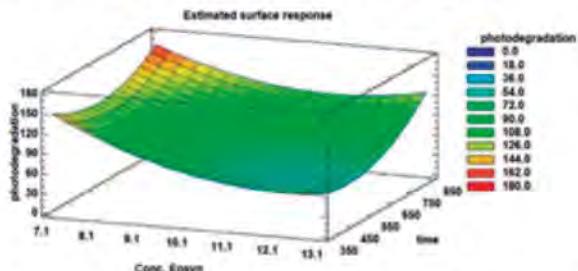


Figura 1. Título de la figura. Leyenda de la figura, el tipo de letra verdana tamaño 9.

Fuente de: xxxxxx

Ecuaciones

Todas las ecuaciones se enumeran al lado de la misma de la forma ecuación 1 citadas en el texto como (ecuación 1). Las ecuaciones se sugieren que se desarrollen en el editor de ecuaciones de Microsoft Word o a través de la aplicación de Mathtype.

Contribución de la autoría

En esta sección se explica cuál fue la contribución de cada autor al artículo. Ejemplo: Primer autor: Metodología, investigación, análisis de datos, conceptualización, escritura – borrador original. Segundo autor: Investigación, conceptualización, análisis de datos, escritura – revisión y edición. Tercer autor: Logística, revisión y edición. Cuarto autor: análisis de datos, revisión y edición. Quinto autor: Adquisición de recursos, administrador del proyecto, supervisión, conceptualización, escritura – revisión y edición.

Agradecimientos

Esta sección se utilizará para hacer un reconocimiento a aquellas personas o instituciones que han hecho contribuciones sustanciales al trabajo o han prestado asistencia en la investigación (técnica, financiera, logística, intelectual, entre otras.). Los agradecimientos deben ir como una sección separada después de la discusión y antes de las referencias. Se incluye aquí, las referencias de los proyectos que hicieron posible el estudio.

Literatura citada

Deberán incluirse todas aquellas fuentes o autores que fueron citados en el cuerpo del documento. Nunca deberá referenciarse un autor que no haya sido citado y viceversa. Tenga en cuenta que no se admitirán artículos sin referencias. Un 60% de las citas debe provenir de investigaciones publicadas en los últimos 10 años.

Esta lista se organiza en orden alfabético y sin enumerar, y cada una debe tener sangría francesa. Para la referenciación de números o volúmenes de alguna publicación usar números arábigos y no romanos.

Forma básica:

Apellido, A.A., Apellido, B.B., y Apellido, C. C. (Año). Título del artículo. Nombre de la revista, volumen (número), pp-pp.

Solo utilice fuentes electrónicas que correspondan a publicaciones con respaldo institucional, cuyo contenido no pueda ser modificado o eliminado en el futuro. No utilice información proveniente de páginas comerciales o sitios de opinión.

El formato de la literatura citada debe seguir la normas APA, en cuanto a citación de artículos científicos, libros, capítulos de libro, páginas Web, tesis de doctorado, maestría y pregrado, informes, reportes, etc.

Anexos

Si tiene figuras que ocupen una página completa (dos cuartillas) o información adicional relevante del estudio, pero que por su extensión no es posible situarla en el texto principal, le recomendamos que lo coloque como anexo al documento (Anexo 1, Anexo 2, etc.). Esta figura quedará enlazada en el espacio web donde se alojará su artículo y en el caso de la versión impresa se maneja con código QR.

*** Se sugiere que los autores usen la plantilla diseñada para los artículos presentados a la revista:

<https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/about/submissions> ***

GUIDE FOR AUTHORS ■

The Journal of Agrarian and Environmental Research (RIAA) is an official publication of the School of Agricultural, Livestock and Environment Sciences (ECAPMA) of the National Open and Distance University (UNAD), destined to publish articles resulting from the original investigations in the agrarian and environmental area and related areas of knowledge in animal production, agriculture and sustainable use of natural resources. As examples of related areas, mention, among others, Ethics, Ecology, Sociology, Geography, History, Law and Economics, when dealing with perspectives of development, styles of agriculture, agrarian history, development sustainable, of environmental ethics, of agrarian and environmental policy, environmental, forestry and agrarian legislation or of significant and innovative contributions with a systemic, interdisciplinary and / or transdisciplinary vision.

The mission of RIAA is to promote communication and collaboration between national and international researchers through the dissemination and transfer of knowledge related to agricultural sciences and the environment, to strengthen the generation of new knowledge. The subjects in which RIAA publishes its research products are:

1. Agroecology and sustainable production models
2. Animal physiology and nutrition
3. Ethology and animal welfare
4. Land use and management
5. Principles and strategies of environmental management
6. Rural development, Education and Social projection
7. Biotechnology and alternative energies
8. Agroforestry systems, agroforestry, agrobiodiversity
9. Clean technologies
10. Integral management of solid waste
11. Environmental Modeling and risk management
12. Climate change
13. Diagnosis and pollution control
14. Animal and environmental ethics
15. Alternative processes for water treatment.

Article arbitration process

The editor receives the postulated manuscripts for publication and reviews that are oriented to the RIAA themes and in accordance with the publication rules. After this, the originals pass to the Editorial Committee for the appointment of external peers. All originals are submitted to arbitration in the double-blind modality, at least two pairs, which must be academics, specialists or *ad hoc* arbitrators. According to the opinion of the peers (which is recorded in the format for evaluation concept), the authors are requested or not to make major or minor modifications and the adaptation of the originals to the editorial policy of the journal.

In the event that a document presents a favorable and unfavorable concept, it will be sent to a third evaluator whose opinion will be final, with the Editorial Committee in charge of resolving any dispute that may arise with respect to the evaluations, and it is the instance that decides which articles will be published, the decisions of the Editorial Committee are unappealable.



The orthographic corrections in the text are made directly by the editorial Committee of the journal, without consulting the authors, it also has the autonomy to review the document and compare it with anti-plagiarism software in order to ensure the originality of the manuscript, after this process, the committee will issue observations that the author must comply with prior to the peer evaluation.

However, a final version prior to printing and / or publication on the RIAA website will be sent to the authors for approval. It is considered that the final version is accepted if the author does not respond in the estimated times.

The reception of a manuscript does not oblige the publication thereof. The revision of the manuscripts will be done respecting the right of the authors to the confidentiality regarding the information, results and creative effort. Likewise, the right to confidentiality of reviewers and editors will be respected.

Remission of the manuscript

As part of the submission process, authors are required to verify that their submission meets all the elements shown below. Authors who do not comply with these guidelines will be returned to the authors.

Initial checklist:

1. The manuscript is unpublished, it has not been previously published, nor is it being simultaneously submitted to another publication.
2. It complies with the guidelines established in the Instructions for Authors.
3. The template designed for the presentation of manuscripts is used.

4. All authors have been registered in the shipment. This step is essential to avoid further delays in the process, editing and publication of the article.
5. SUGGEST 5 POSSIBLE EVALUATORS with their respective name, affiliation and email. Add the data in the box called "Comments for the EDITOR". If you wish, you can mention the possible evaluators with whom you have a conflict of interest and who do not want you to review your manuscript.
6. references written according to APA style.
7. Use thesauri for the construction of keywords.

Free Access policy

RIAA provides free public access to all its content to promote a greater global exchange of knowledge and encourage the reading and citation of published originals. RIAA does not tolerate any form of plagiarism (total, partial or conceptual). In case of identifying any plagiarism, in addition to informing the author of the withdrawal of the article, it will seek to warn the plagiarized authors. RIAA accepts the provisions of the plagiarism policy of the National Open and Distance University (UNAD).

Frequency

RIAA is a biannual publication (January-June and July-December).

Language

Submitted manuscripts may be written in Spanish or English.

Postulation of manuscripts

The RIAA has several types of articles:

- Research Articles
- Review articles

Research articles are associated with the dissemination of research products in the strict sense. This manuscript format should have: introduction, materials and methods (experimental design and statistical analysis), results and discussion, conclusions, acknowledgments, author contributions and cited literature.

On the other hand, **the review article** is the systematization, analysis and balance of the research on a problem and aims to account for their conceptual, methodological and epistemological references, in addition to the advances and trends of the field investigated. It is characterized by presenting a careful analytical review of at least 50 bibliographical references. 60% of the cited literature must come from research published in the last 4 years. The structure that must have is: introduction, approach of the subject, standard bibliographic review (in the form of tables, pictograms, conceptual maps among others.), discussion of the findings, conclusions, acknowledgments and literature cited.

General format of the document

Document in Word format. Letter paper size (21.5 x 27.9 cm); margins 3 cm upper, 2.5 cm left, 3 cm lower and 2 cm right, to a column. Font Verdana, size 10. Interlinear space of 1.5.

It is recommended that the extension of manuscripts postulated for publication does not exceed 4000 words (including tables, figures and literature cited); 6000 words for review articles.

If you have figures that occupy a complete page (two pages), we recommend that you place it as an annex to the document. This figure will be linked in the web space where your article will be housed and in the case of the printed version, it will be handled with a QR code.

Titles and authors

The title must not exceed 15 words. You must describe the content of the article clearly and concisely, avoiding the use of ambiguous words, abbreviations and question marks and exclamation marks.

For each of the authors that appear in the header, you must provide: full name, last academic degree obtained or current studies, institutional affiliation, city and country, email. Omit charges, teaching degrees, research group names, recognitions, etc.

Tables and figures

The tables must be explained by themselves and do not duplicate what is stated in the text, but replace or complement it.

Within the text refer to the table as follows: (Table 1). Present the data in a real table without lines and columns, in single space, without vertical divisions or internal divisions. International System (SI) units must be used. Abbreviations and acronyms should be explained as footnotes in each table. In no case will tables be allowed in landscape format. An example of the presentation of a table is:

Table 1. Example of the presentation of a table

Number of the sample	Name	surname	Providence
M1	Milton	Rodríguez	Cundinamarca
M2	Alberto	Ruiz	Cundinamarca
M3	Ricardo	Cadena	Cundinamarca

Source: xxxxx

Within the category of figures include graphics, images, photos, and each one of them must have its corresponding legend and source, in case it is of its own authorship to mention it. The abbreviations and acronyms must be explained in the legend of the figure. The figures must be sent in .jpg .gif or .png format and must have the necessary quality for publication (more than 1024pixels).

Equations

All the equations are listed next to it in the equation form 1 cited in the text as (equation 1). The equations are suggested to be developed in the Microsoft Word equation editor or through the Mathtype application.

References and bibliographical citations

All those sources or authors that were cited in the body of the document should be included. An author who has not been cited must never be referenced and vice versa. Keep in mind that articles without references will not be accepted. 60% of citations must come from research published in the last 10 years.

This list is organized in alphabetical order and without enumeration, and each one must have French indentation. For the reference of numbers or volumes of some publication, use Arabic and non-Roman numerals.

Basic form:

Surname, A.A., Surname, B.B., and Surname, C. C. (Year). Article title. *Name of the journal, volume* (number), ##-##.

Only use electronic sources that correspond to publications with institutional support, whose content can not be modified or eliminated in the future. Do not use information from commercial pages or opinion sites.

Format of the cited literature must follow the APA standards, in terms of citation of scientific articles, books, book chapters, Web pages, doctoral, master and undergraduate theses, reports, reports, etc.

Annexes

If you have figures that occupy a full page or additional relevant information from the study, but due to their length it is not possible to place it in the main text, we recommend to place this information as an annex to the document (Annex 1, Annex 2, etc.). This information will be linked to the web space, where your article will be hosted and, in the case of the printed version, it is managed with code QR.

*** It is suggested that the authors use the template designed for the articles submitted to the magazine:

<https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/about/submissions>