

LA GRANJA 42

REVISTA DE CIENCIAS DE LA VIDA

Vol. (2)

NÚMERO ESPECIAL

DINÁMICAS DEL AGUA Y LOS PÁRAMOS: IMPACTOS Y ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN



ISSN impreso: 1390-3799 / ISSN electrónico: 1390-8596

MISCELÁNEOS

Conservación de
Frutales Silvestres
Andinos en el
Páramo Occiden-
tal Colombiano

Desafíos de
sostenibilidad
en sistemas de
riego de Los
Andes

Extractos de
Plantas y Agentes
Bactericidas
Aplicados contra
el Tizón del Frijol

Vitrakvi para el
Tratamiento de
Tumores Sólidos
Portadores de
Genes NTRK y
Mutaciones TRKC

Residuos Biomá-
sicos Agrícolas
para la Instalación
de una Biorefine-
ría de Pequeña
Escala

La Granja Revista de Ciencias de la Vida. • Volumen 42 • Número 2 • septiembre 2025 - febrero 2026. Revista semestral de Ciencias de la Vida de la Universidad Politécnica Salesiana del Ecuador. Publicación internacional bilingüe dedicada a estudios relacionados con ciencias ambientales, de la tierra, agropecuarias, biológicas, y sus líneas transversales de conocimiento. Las ideas y opiniones expresadas en las colaboraciones son de exclusiva responsabilidad de los autores y autoras.

EQUIPO EDITORIAL

Consejo Editorial (Editorial Board)

Editores en Jefe (Editors-in-Chief)

Dr. Ignacio de los Ríos, Universidad Politécnica de Madrid, España
Dra. Sheila Serrano Vincenti, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador

Editores Invitados del Número Especial de Dinámicas del Agua y los Páramos (Guest Editors of the Special Issue of Water Dynamics and the Páramos)

PhD. Benito Guillermo Mendoza Trujillo, Universidad Nacional de Chimborazo, Ecuador
PhD. Salvatore Straface, Università della Calabria, Italia
PhD. María Rocio Rodríguez Barroso, Universidad de Cádiz, España

Editores de Sección (Section Editors)

Ciencias de la Tierra (Earth sciences)

Dr. Thomas Condom, Institut de Recherche Pour Le Développement, Francia
Dr. César Iván Álvarez, University of Augsburg, Alemania
Dr. Charles Cachipundo, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador

Ciencias Agropecuarias y Veterinarias (Agricultural and Veterinary Sciences)

Dra. Nora Mestorino, Universidad Nacional de La Plata, Argentina
Dra. Nancy Bonifáz, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador
Dra. Narcisa Relqueme, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador

Ciencias Biológicas, Biotecnológicas, Químicas y afines (Biological, Biotechnological, Chemical and related Sciences)

Dr. Paco Noriega, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador
Dr. Lorenzo Guerrini, Università di Firenze, Italia
Dr. Alejandro Heredia Barbero, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), México
Dr. Elena Coyago, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador

Ciencias Ambientales (Environmental Sciences)

Dr. Jorge G Figueroa, Universidad Técnica Particular de Loja (UTPL), Ecuador
Dra. María Rocio Rodríguez, Universidad de Cádiz, España
Dr. Lisandro Alvarado, Sistema Nacional de Investigadores (SNI) - Nivel I- CONACYT, México
Dr. Renato Sánchez, Consultor independiente, Ecuador

Comité de ética y bioética (Ethics and Bioethics Committee)

Dra. Gladys Bustamante, Universidad Mayor de San Andrés, Bolivia. Comité Iberoamericano de Ética (CIEB)
Dr. Ángel Acevedo-Duque, Universidad Autónoma de Chile, Chile
Dra. Elena Coyago, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador

Coeditor Internacional en inglés (International coeditor in English)

Dr. Lorenzo Guerrini, Università di Firenze, Italia

Coeditor Internacional en portugués (International Coeditor in Portuguese)

Dra. Rocio Elizabeth Contero Callay, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador

Consejo de Publicaciones (Publication Board)

Dr. Juan Cárdenas Tapia PRESIDENTE
Dr. José Juncosa Blasco ABYA-YALA
Dr. Esteban Inga VICERRECTOR DE INVESTIGACIÓN
Dr. Angel Torres-Toukoumidis EDITOR DE UNIVERSITAS
Dr. Jaime Padilla Verdugo EDITOR DE ALTERIDAD
Dra. Sheila Serrano Vincenti EDITORA DE LA GRANJA
Dr (c). Jorge Cueva Estrada EDITOR DE RETOS
Dr. John Calle Sigüencia EDITOR DE INGENIUS
Dra. Floralba Aguilar Gordón EDITORA DE SOPHIA
Dra. Betty Rodas Soto EDITORA DE UTOPIA
Dra. Mónica Ruiz Vásquez EDITORA DEL NOTI-UPS
Dr. Jorge Altamirano Sánchez EDITORA REVISTA CÁTEDRA UNESCO
MSc. David Armendáriz González EDITOR WEB
Dr. Angel Torres-Toukoumidis EDITOR GENERAL

Consejo Técnico (Technical Board)

Lcda. María José Cabrera (Técnica Marcalyc)
Lcdo. Christian Arpi (Coordinador Community Managers)
MSc. Mariana Luna (Asistente editorial)
MSc. Luis Felipe Gualco (Maquetador)
Dr. Danny Vargas (Editor Asistente)

Servicio de Publicaciones (Publications Service)

Hernán Hermosa (Coordinación General)
Marco Gutiérrez (Soporte OJS)
Paulina Torres (Edición)
Raysa Andrade (Maquetación)
Martha Vinuesa (Maquetación)
Adriana Curiel (Traductora)

Editorial

Editorial Abya Yala (Quito-Ecuador)
Avenida 12 de octubre N-422 y Wilson
Bloque A, UPS Quito, Ecuador
Casilla 17-12-719
Teléfonos: (593-2) 3962800 ext. 2638
Correo electrónico: editorial@abyayala.org

Fotografía Portada (Cover Photo)

Lagunas de Ozogoché, Provincia de Chimborazo
Autor: Benito Guillermo Mendiza Trujillo

Fotografía Retiro (Final Photo)

Corona de Nubes
Autor: Jonathan González Chuqui

LA GRANJA: REVISTA DE CIENCIAS DE LA VIDA

Volumen 42, Número 2, septiembre 2025 – febrero 2026

ISSN impreso 1390-3799 • ISSN electrónico 1390-8596

La administración de LA GRANJA se realiza a través de los siguientes parámetros:

• La revista utiliza el sistema antiplagio académico  **iThenticate**
Professional Plagiarism Prevention

• Los artículos cuentan con código de identificación (*Digital Object Identifier*)



• El proceso editorial se gestiona a través del *Open Journal System*



Es una publicación de acceso abierto (*Open Access*) con licencia *Creative Commons*



Las políticas *copyright* y de uso *postprint*, se encuentran publicadas en el Repositorio de Políticas de Autoarchivo *Sherpa/Romeo*.

Los artículos de la presente edición pueden consultarse en <https://lagranja.ups.edu.ec/>



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA DEL ECUADOR

LA GRANJA, está indexada en las siguientes Bases de Datos y sistemas de información científica:

BASES DE DATOS INTERNACIONALES SELECTIVAS



PLATAFORMAS DE EVALUACIÓN DE REVISTAS



DIRECTORIOS SELECTIVOS



HEMEROTECAS SELECTIVAS



BUSCADORES DE LITERATURA CIENTÍFICA OPEN ACCESS



POLÍTICAS DE COPYRIGHT DE LAS EDITORIALES Y AUTOARCHIVO



OTRAS BASES DE DATOS BIBLIOGRÁFICAS



CATÁLOGO DE BIBLIOTECAS INTERNACIONALES UNIVERSITARIAS





Universidad
de Navarra

MUHLENBERG
COLLEGE

FRANKLIN & MARSHALL
COLLEGE



TYNDALE
UNIVERSITY COLLEGE & SEMINARY



THE UNIVERSITY of NORTH CAROLINA
GREENSBORO



LA GRANJA:
REVISTA DE CIENCIAS DE LA VIDA

Consejo Científico (Advisory Board)

- Dr. Guillermo Marcillo, University of Illinois Urbana Champaign, EEUU
Dr. Alessandro Medici, Università di Ferrara, Italia
Dr. John Mejía, Universidad de Nevada, Estados Unidos
Dra. Enrica Caporali, Università di Firenze, Italia
Dr. Ankit Singla, Ministry Office of Agriculture, Co-operation and
Farmers Welfare, India Government
Dra. Paola VitaFinzi, Università di Pavia, Italia
Dr. Geovanni Vidari, Università di Pavia, Italia
Dr. Flavio Contreras-Torres, Universidad Autónoma de México, México
Dr. Miguel A. Altieri, University of California, EEUU
Dra. Clara Inés Nicholls, University of California, EEUU
Dr. Jaime Vadell Adrover, Universidad de las Islas Baleares, España
Dra. Janeth Patricia Muñoz Eraso, Pontificia Universidad Javeriana, Colombia.
Dr. Marcos Villacís, Escuela Politécnica Nacional, Ecuador
Dra. Silvia Perez Damonte, Universidad de Buenos Aires, Argentina
Dr. Fernando Funes Monzote, Universidad de Matanzas, Cuba
Dra. Alessandra Guerrini, Università di Ferrara, Italia
Dr. Giovanni Bernacchia, Università di Ferrara, Italia
Proff. León Escobar Moreira, SYNAPTRONIC, EEUU
Dr. Lorenzo Guerrini, Università di Firenze, Italia
Dr. José Luis Santos. International CLIVAR Project Office, China
Dr. Solveig Tosi, Università di Pavia, Italia
Dra. Priscila dos Santos Silva, Universidad de Sao Paulo, Brasil
Dra. Connie Gallardo Vela, Universidad de Sao Paulo, Brasil
Dr. Thomas Condom, Institut de Recherche Pour Le Développement, Francia
Dr. Leonardo Basile, Escuela Politécnica Nacional, Ecuador
Dra. Claudinéia Brazil, Faculdade Dom Bosco de Porto Alegre, Brasil
Dr. Alejandro Fontana, Universidad de Piura, Perú
Dra. Adriana Sánchez Urdaneta, Universidad de Zulia, Venezuela
Dr. Emmanuel Donkor, Kwame Nkrumah University of Science and Technology, West Africa
Dr. Jorge Palomeque Santiago, Instituto Mexicano del Petróleo, México
Dr. Alejandro Heredia Barbero, Universidad Nacional Autónoma
de México, Facultad de Ciencias
Dr. Carlos Hernandez Medina, Centro Universitario Municipal Camajuaní, Cuba
Dr. Daniel A. Lowy, Northern Virginia Community College, EEUU
Dr. László Palcsu, Institute of Nuclear Research of the Hungarian Academy of Sciences, Hungría
Dr. Marjan Temovski, Institute of Nuclear Research of the Hungarian Academy of Sciences, Hungría
Dr. Elemer Laszlo, Institute of Nuclear Research of the Hungarian Academy of Sciences, Hungría
Dr. Pablo Marini, Universidad Nacional de Rosario, Argentina
Dr. Antonio Panico Università degli Studi Pegaso, Italia
Dr. Fernando Bimbela, Universidad Pública de Navarra, España
Dr. Panagiotis Kechagiopoulos, University of Aberdeen, Reino Unido.

Dr. Carlo Visconti, Politecnico di Milano, Italia
Dra. Marta Elena Alonso, Universidad de León, España
Dra. Alison Hanlon, University College Dublin, Irlanda
Dr. Mehmood Ali, NED University of Engineering and Technology, Pakistán
Dra. Ana Teodoro, Universidade do Porto, Portugal

Consejo Internacional de Revisores (International Reviewers Board)

Dr. Guillermo Marcillo, University of Illinois Urbana Champaign, EE.UU.
Dr. Antonio Panico Università degli Studi Pegaso, Italia
Dr. John Mejía, Universidad de Nevada, EE.UU.
Dra. Enrica Caporali, Università di Firenze, Italia
Dra. Nancy Bonifáz, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador
Dra. Paola VitaFinzi, Università di Pavia, Italia
Dr. Flavio Contreras-Torres, Universidad Autónoma de México, México
Dr. Alejandro Heredia Barbero, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), México
Prof. León Escobar Moreira, SYNAPTRONIC, EE.UU.
Dr. Giovanni Vidari, Università di Pavia, Italia
Dra. Lorena Meneses, Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Ecuador
Dr. Fernando Funes Monzote, Universidad de Matanzas, Cuba
Dr. Nicolás Vásquez, Escuela Politécnica Nacional, Ecuador
Dr. Giovanni Bernacchia, Università di Ferrara, Italia
Dr. Juan H. Avellaneda Cevallos, Universidad Técnica Estatal de Quevedo Ecuador
Dr. Lorenzo Guerrini, Università di Firenze, Italia
Dr. José Luis Santos, International CLIVAR Project Office, China
Dr. Solveig Tosi, Università di Pavia, Italia
Dra. Pamela Jaramillo, Mikuna-Food Science and Technology, Ecuador
Dr. Juan Enrique Tacoronte, Universidad Central del Ecuador, Ecuador
Dra. Mercy Bordor, Escuela Politécnica del Litoral
Dr. Christian Domínguez, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador
MSc. Laura Huachi, Universidad Politécnica Salesiana
Dra. Priscila dos Santos Silva, Universidad de Sao Paulo, Brasil
Dr. Pablo Marini, Universidad Nacional de Rosario, Argentina
Dra. Claudineia Brazil, Universidad de Don Bosco de Puerto Alegre, Brasil
Dra. Adriana Sánchez Urdaneta, Universidad de Zulia, Venezuela
MSc. Bernardo Navarrete, Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias-INIAP, Ecuador
Dr. Jorge Palomeque Santiago, Instituto Mexicano del Petróleo, México
Dr. Antonio Panico Università degli Studi Pegaso, Italia
MSc. Patricio Yáñez Moretta, Universidad Internacional del Ecuador, Ecuador
Dr. Emmanuel Donkor, Kwame Nkrumah University of Science and Technology, West Africa
Dr. Carlos Hernandez Medina, Centro Universitario Municipal Camajuaní, Cuba
Dr. Daniel A. Lowy, Northern Virginia Community College, EE.UU.
Dr. Marjan Temovski, Institute of Nuclear Research of the Hungarian Academy of Sciences, Hungría
Dr. Elemer Laszlo, Institute of Nuclear Research of the Hungarian Academy of Sciences, Hungría
Dr. Manuel Maldonado, Escuela Politécnica del Ejército, Ecuador.
Dr. Mehmood Ali, NED University of Engineering and Technology, Pakistán
Dr. Oscar Peña Cáceres, Universidad Nacional de Piura, Perú
Dra. Ana Teodoro, Universidade do Porto, Portugal
Dr. Panagiotis Kechagiopoulos, University of Aberdeen, Reino Unido
Dr. Carlo Visconti, Politecnico di Milano, Italia
Dr. Fernando Bimbela, Universidad Pública de Navarra, España
Dra. Marta Elena Alonso, Universidad de León, España
Dra. Alison Hanlon, University College Dublin, Irlanda
Dr. Sabino Armenise, Universidad Rey Juan Carlos, España
Dr. Jesús Evaristo Tumi Quispe, Universidad Nacional del Altiplano, Perú

ÍNDICE

Editorial	7
Artículos Científicos	
NÚMERO ESPECIAL: DINÁMICAS DEL AGUA Y LOS PÁRAMOS. IMPACTOS Y ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN	
Caracterización de frutales silvestres andinos como estrategia de conservación ambiental en el páramo de la Cordillera Oriental, Colombia	11
Manuel Galvis Rueda y Manuel Torres Torres.	
Análisis de los Desafíos de Sostenibilidad en Sistemas de Riego de los Andes	22
Gina Berrones y Rolando Céleri.	
Gestión comunitaria y sostenibilidad en sistemas de riego andinos mediante indicadores de uso eficiente del agua en la agricultura	41
Charles Cachipundo, Mercy Ilbay y Narcisa Requeme.	
CIENCIAS AGROPECUARIAS	
Estudio de la eficacia de los extractos de plantas y agentes bactericidas aplicados contra <i>Xanthomonas axonopodis</i>, el agente causante del tizón del frijol	61
Elias Mjaika Ndifon.	
Elección de planta trampa y sustrato para la producción de Inóculo Micorrízico	78
Jaime Naranjo-Morán, Karen Olivo-Fernández, Milton Barcos-Arias y Rodrigo Oviedo-Anchundia.	
CIENCIAS DE LA TIERRA	
Efectos del cambio de uso de suelo y cambio climático en la distribución potencial de la caña de azúcar en el Valle del Chota, Ecuador	90
Paúl Arias-Muñoz, Evelin Lizeth Chamorro-Benavides, Sandy Anabel Patiño-Yar, Gabriel Jácome-Aguirre y Oscar Rosales.	
BIOLOGÍA CELULAR Y MOLECULAR	
Eficacia de Vitrakvi (larotrectinib) para el tratamiento de tumores sólidos portadores de genes NTRK y el impacto de las mutaciones TRKC	106
Ali Adel Dawood.	
BIOTECNOLOGÍA	
Meta-análisis de la información científica sobre la especie <i>Carludovica palmata</i> Ruiz & Pavón	122
Lucero Alejandra Perera-Hau, Alberto Santillán-Fernandez, Norman Aguilar-Gallegos, Juan Carlos Alamilla-Magaña, Tomas Augusto Gonzales-Estrada y José Humberto Caamal-Velázquez.	
Estudio de residuos biomásicos agrícolas para la instalación de una biorrefinería de pequeña escala	136
Josseline Mishell Solís Bermúdez, Gabriela Alexandra Zambrano Varela, Ramón Eudoro Cevallos Cedeno y María Antonieta Riera.	
Obtención de bioetanol a partir de la cáscara de cacao (<i>Theobroma cacao</i>) usando <i>Trichoderma reesei</i> y <i>Trichoderma ghanense</i> para la hidrólisis enzimática	154
Joel Eduardo Vielma-Puente, Tatiana Zamora Zamora, Luis Lenin Galarza Romero, Meribary Margarita Monsalve, Joan Vera Villalobos, Viviana Andrea Corrales Mendoza, Fernanda Carolina Chacha Coyago, Darling Balón Cortez, Leticia Villacis Morán y Rodrigo Fernando Espinoza Lozano.	
Normas para autores	166

Estimadas y estimados lectores,

Los páramos andinos representan menos del 2% de la superficie continental sudamericana, pero regulan buena parte del suministro hídrico que sostiene a más de 60 millones de personas aguas abajo. En la última década estos ecosistemas han pasado de ser “tierras de neblina” a laboratorios naturales donde convergen la ecología de alta montaña, la gestión comunitaria del agua y la gobernanza ambiental. Conscientes de este momento histórico, La Granja, Revista de Ciencias de la Vida, presenta un número especial que reúne investigaciones que iluminan distintos ángulos de la dinámica agua-páramo y esbozan rutas para su conservación y uso sostenible.

El primer aporte, que viene desde Colombia, intitulado “Caracterización de frutos silvestres andinos como estrategia de conservación ambiental en el páramo occidental colombiano” de Galvis Rueda y Torres, documenta 48 especies frutales en 14 familias botánicas y muestra cómo el conocimiento etnobotánico puede articularse con programas de guardapáramos y ecoturismo comunitario para frenar la

degradación causada por minería y ganadería intensiva. Los resultados confirman que conservar la diversidad vegetal no solo protege funciones hidrológicas clave almacenamiento y liberación de agua sino que diversifica medios de vida locales, un elemento crítico frente al cambio climático.

Desde la óptica de la ingeniería y la política hídrica, “Análisis de los desafíos de sostenibilidad en sistemas de riego de los Andes” de Gina Berrones y Rolando Célle-ri quienes analizan 235 sistemas de riego ecuatorianos y revelan cuellos de botella estructurales: asignaciones de agua desproporcionadas, débil cumplimiento normativo y fuentes de ingreso agrícola cada vez menos relevantes. El estudio demuestra que la sostenibilidad hídrica no depende únicamente de la oferta física sino de arreglos institucionales robustos; mejorando la gobernanza, la cual emerge así como una “infraestructura invisible” que asegura eficiencia y equidad en el uso del agua.

Complementa este enfoque la investigación de Charles Cachipundo, Mercy Ilbay

y Narcisa Requielme: “Gestión comunitaria y sostenibilidad en sistemas de riego andinos mediante indicadores de uso eficiente del agua”. Mediante la metodología MESMIS y la técnica Delphi, los autores construyen 31 indicadores enlazados a los ODS y a los Principios de Inversión Responsable en Agricultura, ofreciendo una herramienta local que empodera a las juntas de agua para auditar su propio desempeño y negociar políticas públicas con evidencia en mano. Este aporte es vital porque traduce marcos globales en métricas locales comprensibles para líderes comunitarios, técnicos y tomadores de decisión.

En conjunto, los artículos de este número muestran, que la resiliencia hídrica de los páramos se basa en la diversidad biocultural: proteger frutales silvestres es tan estratégico como monitorear caudales. Además, que los desafíos de sostenibilidad de los sistemas de riego no son meramente hidráulicos; demandan reglas claras, incentivos apropiados y participación informada. También, que medir importa: sin indicadores consensuados el diálogo entre comunidades, academia y Estado se estanca en percepciones.

Desde nuestra Sección de Misceláneos y entrando al área de la Biotecnología, el investigador Elias Mjaika Ndifon, adscrito a la Facultad de Agricultura de la Alex Ekwueme Federal University Ndufu-Alike, Nigeria; evalúa la eficacia de extractos de plantas y antibióticos en el control del tizón del frijol, enfermedad causada por *Xanthomonas axonopodis*. El estudio, desarrollado

tanto en laboratorio como en invernadero, demuestra que antibióticos como la tetraciclina, lincomicina y eritromicina alcanzan niveles de inhibición superiores al 50%, mientras que extractos de *Eucalyptus globulus* y *Aframomum melegueta* también presentan efectos bactericidas significativos, proponiendo nuevas rutas de manejo fitosanitario.

Desde Ecuador, los investigadores Jaime Naranjo-Morán (Universidad Politécnica Salesiana, UPS), Karen Olivo-Fernández, Milton Barcos-Arias y Rodrigo Oviedo-Anchundia (todos de la Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL), junto con Barcos-Arias también afiliado a la Universidad Espíritu Santo (UEES), presentan un estudio sobre la selección de plantas trampa y sustratos adecuados para la producción de inóculo micorrízico. El trabajo identificó a *Plectranthus tomentosa*, cultivada en una mezcla de arena, cascarilla de arroz y turba, como la especie con mayor micorrización y esporulación, aportando al desarrollo de biotecnologías para la propagación de micorrizas arbusculares.

Asimismo, desde la Universidad de Mosul en Irak, el Dr. Ali Adel Dawood, investiga el potencial terapéutico del inhibidor Vitrakvi (Larotrectinib) en el tratamiento de tumores sólidos con genes NTRK fusionados. Mediante técnicas de acoplamiento molecular, el autor analiza la interacción del fármaco con los receptores TRK, especialmente en presencia de mutaciones en TRKC, revelando cambios estructurales que podrían afectar su eficacia. Este trabajo

constituye una valiosa contribución en el desarrollo de terapias dirigidas personalizadas en oncología molecular.

Desde las ciencias de la Tierra, el equipo de la Universidad Técnica del Norte (UTN), conformado por Paúl Arias-Muñoz, Evelin Chamorro-Benavides, Sandy Patiño-Yar, Gabriel Jácome-Aguirre y Oscar Rosales, aborda los efectos combinados del cambio de uso de suelo y del cambio climático sobre la distribución potencial de la caña de azúcar en el Valle del Chota, Ecuador. Utilizando proyecciones de cobertura de suelo y escenarios climáticos RCP 4.5 y RCP 8.5, el estudio revela una reducción del 14,65% en superficie cultivable por efecto antrópico, pero un incremento proyectado en zonas óptimas bajo condiciones climáticas futuras, destacando la complejidad de la planificación agrícola frente a múltiples amenazas.

Abordado a las Ciencias Agropecuarias, los investigadores Lucero Perera Hau, Juan Carlos Alamilla, Tomás Gonzales Estrada y José Humberto Caamal del Colegio de Postgraduados Campus Campeche (BIO-SAT), junto a Alberto Santillán Fernández (IxM-CONAHCyT) y Norman Aguilar Gallagos (Universidad Panamericana, México), realizan un meta-análisis sobre la investigación científica en torno a *Carludovica palmata* Ruíz & Pavón, conocida por su uso en la elaboración de sombreros tradicionales. El estudio revela que, a pesar del creciente interés en temas como la transformación artesanal y la producción tradicional, existe un vacío notorio en el desarrollo

de técnicas de propagación, especialmente in vitro, que resulta crítico ante la creciente demanda del mercado artesanal.

Desde las Ciencias Ambientales, la Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas de la Universidad Técnica de Manabí del Ecuador, a través de las investigadoras Josseline Solís Bermúdez, Gabriela Zambrano Varela, María Antonieta Riera y el Dr. Ramón Eudoro Cevallos Cedeño analizan el potencial de diversos residuos agrícolas para la instalación de una biorrefinería de pequeña escala. Mediante un enfoque multicriterio con el método AHP, identifican al bagazo de caña de azúcar y la cascarilla de café como las biomásas más prometedoras para la obtención de biocombustibles y productos químicos, consolidando la relevancia de la bioeconomía en el aprovechamiento sostenible de residuos agroindustriales.

Finalmente, un grupo multidisciplinario de investigadores de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL) y de la Universidad de Guayaquil, liderado por Tatiana Zamora, en colaboración con Joel Vielma, Luis Galarza, Meribary Monsalve, Joan Vera, Viviana Corrales, Fernanda Chacha, Darling Balón, Leticia Villacis y Rodrigo Espinoza, presentan un estudio sobre la producción de bioetanol a partir de cáscaras de cacao (*Theobroma cacao*).

El proceso combina pretratamientos alcalinos, hidrólisis enzimática con cepas endófitas de *Trichoderma reesei* y *T. ghanense*, y fermentación alcohólica con *Saccharomy-*

ces cerevisiae, logrando una producción significativa de bioetanol, con implicaciones relevantes en el contexto de transición energética sostenible.

De esta manera, invitamos a los lectores a explorar estas páginas con una mirada interdisciplinaria. Encontrarán datos

empíricos robustos, metodologías replicables y sobre todo ejemplos de acción colectiva que trascienden fronteras nacionales. Confiamos en que este número especial inspire nuevas alianzas para que, en los páramos, el agua siga fluyendo no solo en las vertientes, sino también en la ciencia y en la esperanza de quienes dependen de ella.

Cordialmente,

PhD. Ignacio de los Ríos
Universidad Politécnica de Madrid, España
EDITOR EN JEFE

PhD. Sheila Serrano Vincenti
Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador
EDITORA EN JEFE

PhD. Benito Guillermo Mendoza Trujillo
Escuela Politécnica del Chimborazo
EDITOR INVITADO



CARACTERIZACIÓN DE FRUTALES SILVESTRES ANDINOS COMO ESTRATEGIA DE CONSERVACIÓN AMBIENTAL EN EL PÁRAMO DE LA CORDILLERA ORIENTAL, COLOMBIA

CHARACTERIZATION OF ANDEAN WILD FRUIT TREES AS AN ENVIRONMENTAL
CONSERVATION STRATEGY IN THE EASTERN MOUNTAIN RANGE OF PÁRAMO,
COLOMBIA

Manuel Galvis Rueda*¹  y Manuel Torres Torres*² 

¹Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Facultad de Ciencias de la Educación. Grupo de investigación MICRAM, Tunja, Boyacá, Colombia. [<https://ror.org/04vdmkb59>]

²Universidad Nacional Abierta y a Distancia. Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente. Grupo de Investigación GIGASS, Tunja, Boyacá, Colombia. [<https://ror.org/047179s14>]

*Autor para correspondencia: manuel.galvisrueda@uptc.edu.co; manuel.torres@unad.edu.co

Manuscrito recibido el 30 de julio de 2024. Aceptado, tras revisión el 22 de abril de 2025. Publicado el 1 de septiembre de 2025.

Resumen

Los páramos son ecosistemas comprendidos entre 3200 m.s.n.m, y 4900 m.s.n.m. Actualmente, en Boyacá se presentan en los páramos procesos de explotación minera, deforestación, ganadería y conservación de varias especies de plantas, así como declaratorias de reservas naturales que permiten fortalecer el ecoturismo de naturaleza. El objetivo de la investigación fue realizar la caracterización de árboles, arbustos y lianas de especies de frutales nativos, además registrar el estado del uso de especies vegetales de tipo frutales y del conocimiento que tiene la comunidad en el departamento de Boyacá, se aplicaron metodologías de transeptos, con realización de parcelas cuadradas, según el tipo de cobertura de bosques y arbustales. Adicional, se realizó el inventario de las especies de frutales, el registro fotográfico con la identificación por expertos taxónomos, catálogos especializados en botánica. Como resultado; se registraron 48 especies en 14 familias botánicas, entre las plantas identificadas. La familia más diversa en número de géneros y especies es Ericaceae con 12 especies, Rosaceae 8 especies, Solanaceae y Passifloraceae con 3 especies, Myrtaceae con 2 especies y 6 familias con una especie. Así mismo se sistematizaron los procesos de categorización e información comunitaria en categorías de uso etnobotánico, ejemplo: medicinal, tinturas, jugos y conservación identificaron otras especies con funciones alimentarias por lo que se elaboró un catálogo botánico fotográfico descriptivo. Conclusión; es importante educar a la comunidad, así como organizar guarda páramos, para permitir la conservación, la diversificación y el aprovechamiento de productos y subproductos del páramo.

Palabras clave: Biodiversidad, frutas nativas, sistemas productivos, botánica.

Abstract

The páramos are ecosystems between 3,200 and 4,900 meters above sea level. Currently, in Boyacá, the páramos are undergoing mining, deforestation, cattle ranching, and conservation of various plant species, as well as the declaration of nature reserves that strengthen nature ecotourism. The objective of the research was to characterize trees, shrubs, and vines of native fruit tree species, as well as to record the status of the use of fruit-type plant species and the knowledge held by the community in the department of Boyacá. Transect methodologies were applied, with the creation of square plots according to the type of forest and shrub cover. Additionally, an inventory of fruit tree species was conducted, along with photographic records with identification by expert taxonomists and specialized botanical catalogs. As a result, 48 species were recorded in 14 botanical families among the identified plants. The most diverse family in number of genera and species is Ericaceae with 12 species, Rosaceae with 8 species, Solanaceae and Passifloraceae with 3 species, Myrtaceae with 2 species and 6 families with one species. Likewise, the categorization and community information processes were systematized in categories of ethnobotanical use, for example: medicinal, tinctures, juices and conservation. Other species with nutritional functions were identified, for which a descriptive photographic botanical catalog was prepared. Conclusion: It is important to educate the community, as well as organize paramo rangers, to allow the conservation, diversification and use of products and by-products of the páramo.

Keywords: Biodiversity, native fruits, productive systems, botany.

Forma sugerida de citar: Galvis Rueda, M. y Torres-Torres, M. (2025). Caracterización de frutales silvestres andinos como estrategia de conservación ambiental en el páramo de la Cordillera Oriental, Colombia. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*. Vol. 42(2):11-21. <https://doi.org/10.17163/lgr.n42.2025.01>.

IDs Orcid:

Manuel Galvis Rueda: <https://orcid.org/0000-0002-4978-8615>

Manuel Torres Torres : <https://orcid.org/0000-0001-6033-4799>

1 Introducción

La diversidad vegetal en el páramo es un elemento clave a caracterizar, a pesar del hecho de que, como lo señalan Hofstede et al. (2003), el número de géneros y especies identificados como endémicos en los ecosistemas de páramo es relativamente bajo. Sin embargo, los valores conocidos del número de especies endémicas son significativamente elevados. Una posible explicación de este fenómeno es la aparición geológica relativamente reciente de este ecosistema, que puede haber propiciado la especialización a nivel de especie y no a nivel de género. Por ejemplo, la familia ericaceae en los bosques neotropicales está entre las más representativas, principalmente habitando bosques montanos. Actualmente está representada por aproximadamente 46 géneros y 900 especies, de las cuales aproximadamente el 94% son endémicas (Kron et al., 2002).

Esta investigación tiene como objetivo caracterizar y documentar las plantas frutícolas nativas y propone estrategias para su conservación dentro de los sistemas andinos. Las metodologías de trabajo de campo incluyeron el establecimiento de doce parcelas cuadradas para inventarios de plantas, teniendo en cuenta la cobertura arbustiva y forestal a través de diferentes transectos altitudinales en el complejo páramo Guantiva-La Rusia, ubicado en el corredor occidental de Boyacá. Entre otros aspectos, el estudio aborda la necesidad de identificar las especies nativas de frutas silvestres que juegan un papel fundamental en la dinámica del ecosistema y están asociadas con áreas territoriales específicas. Esto implica que los beneficios ecológicos de estas especies frutales promueven el equilibrio del ecosistema y sirven como fuente de alimento para los miembros de las redes alimentarias, como los consumidores (Parada-Quintero et al., 2012). Por lo tanto, esta investigación descriptiva y experimental mejorará las oportunidades de colaboración con las comunidades rurales locales en los páramos.

Las frutas se encuentran entre los alimentos más consumidos tanto en las zonas rurales objeto de estudio como a nivel mundial, particularmente en la región andina de América Latina (Sanjinés and Øllgaard, 2006), como lo ejemplifica la familia ericaceae, cuya distribución se ajusta a los hallazgos del presente estudio.

2 Materiales y Métodos

Esta investigación se llevó a cabo para caracterizar y documentar las especies nativas de frutas andinas con el objetivo de promover su conservación. Se adoptó un enfoque de métodos mixtos y una metodología descriptiva sistemática, estableciendo doce parcelas de inventario basadas en métodos de investigación de vegetación de Rangel and Velázquez (1997). Estas parcelas consideraron la cobertura arbustiva y forestal natural a lo largo de transectos altitudinales en el complejo páramo Guantiva-La Rusia, cubriendo los municipios de Cóbbita, Sotaquirá, Paipa y Duitama, Boyacá.

El estudio titulado “*Caracterización de las Especies de Frutos Silvestres como Estrategia de Conservación del Páramo en Boyacá*” involucró el inventario y documentación, incluyendo los registros fotográficos de las especies y sus frutos. Para identificar sus usos, fue esencial el diálogo directo con las comunidades cercanas al páramo (Galvis-Rueda and Torres-Torres, 2017).

2.1 Enfoque de la investigación:

La investigación se basó en un diseño de métodos mixtos, representando un conjunto de procesos sistemáticos, empíricos y críticos que involucran la recolección y el análisis de datos tanto cuantitativos como cualitativos. Este análisis integrado mejora la comprensión del fenómeno estudiado (Hernández-Sampieri and Mendoza, 2018). Según Creswell (2013) y Lieber and Weisner (2010), citados en Hernández-Sampieri and Mendoza (2018), los métodos mixtos incorporan datos numéricos, textuales y visuales para explorar problemas complejos.

2.2 Paradigma de la investigación:

La investigación se basó en un paradigma sociocrítico, caracterizado por la autorreflexión e impulsado por las necesidades de la comunidad como base para la construcción de conocimiento (Alvarado and García, 2008).

2.3 Población de estudio:

Se convocó a una muestra de 80 participantes adultos, 20 de cada municipio. En Cóbbita, los parti-

cipantes pertenecían a la comunidad Laguna y el Parque Regional El Valle; en Sotaquirá, desde la zona central y la aldea de Avendaños; en Paipa, de los pueblos de Los Medios y Palermo, incluido el Parque Municipal de Ranchería; y en Duitama, de las comunidades limítrofes con la Reserva Forestal de Andalucía. La Corporación Tibairá participó con cinco miembros, junto a 15 campesinos de los poblados La Quinta y Santana, todos los cuales realizan actividades agrícolas en el páramo bajo estudio.

2.4 Fases de la investigación:

Fase 1 -Formulación del plan de acción:

Después de Latorre (2003), se elaboró un plan de acción con componentes flexibles y adaptables al contexto para la obtención de la información y la reflexión crítica.

Fase 2 -Identificación botánica de árboles frutales:

Los especímenes recolectados fueron secados e identificados en el Instituto de Ciencias Naturales (ICN) de la Universidad Nacional de Colombia o en la UPTC en Tunja. La identificación taxonómica siguió a Cronquist (1981) y utilizó fuentes como el Herbario Virtual Alexander von Humboldt. Cada espécimen recibió una etiqueta de recolección con datos esenciales de campo. Las identificaciones se verificaron con expertos utilizando las revisiones taxonómicas más actuales y el Herbario Nacional Colombiano (COL), al que se accedió virtualmente.

Inventario y catalogación:

Se elaboró un catálogo fotográfico de las especies frutícolas en las reservas naturales y área de estudio para facilitar el reconocimiento. Esto incluyó información etnobotánica sobre usos locales, descripciones morfológicas y botánicas, entre otros rasgos.

Fase 3 -Análisis de uso etnobotánico:

Se implementó un plan de actividades detallado, incorporando la categorización etnobotánica basada en la base de datos Kew-Colplanta (Sánchez et al., 2021). Se realizaron 20 entrevistas en cada municipio (80 en total), dirigidas a residentes adultos con influencia en las reservas forestales. Los entrevistados identificaron las especies de frutas silves-

tres y sus usos -como la extracción de alimentos o pigmentos- contribuyendo a un catálogo más completo. El trabajo se apoyó en textos especializados como Botánica Descriptiva de Cultivos Tropicales (León, 1987, IICA, Costa Rica).

Fase 4 -Observación de campo y participación comunitaria:

Se realizaron observaciones de campo en las granjas para reunir pruebas y evaluar el diálogo directo con los agricultores locales. Estas observaciones se planificaron y grabaron sistemáticamente para abordar los temas de la investigación, en particular en relación con los problemas de preservación de páramo identificados por la comunidad.

Fase 5 -Reflexión participativa y planificación de la conservación:

Siguiendo el modelo de investigación en acción (Kemmis and McTaggart, 1988), la reflexión se centró en la evaluación de los resultados de los esfuerzos de conservación impulsados por la comunidad. El estudio llevó a la propuesta de una estrategia de conservación a mediano plazo: el diseño de un vivero en la región de Duitama-Río Surba. Esta iniciativa tiene como objetivo apoyar la propagación de especies nativas como respuesta a los impactos del cambio climático y los frecuentes incendios forestales en los ecosistemas de alta montaña.

2.5 Análisis de datos:

El proceso de análisis de datos cualitativos siguió el marco descrito por Rodríguez et al. (2005), que implica la organización e interpretación sistemáticas de la información para identificar relaciones, significados y conclusiones.

3 Resultados y Discusión

En el páramo y en la región de estudio se registraron un total de 48 especies, agrupadas en 14 familias (Tabla 1). De éstas, el 99% corresponden a especies nativas de Colombia y distribuidas en toda América del Sur, mientras que el 1% son especies introducidas, cultivadas o naturalizadas coincidentes de investigaciones (Aguilera-Arango et al., 2020). Se encontraron un total de 45 especies entre los 2.900 y los 3.600 m.s.n.m., cada una con algún

uso tradicional o potencial para fines alimentarios o medicinales. De estas, 40 especies tienen potencial para la restauración ecológica y la conservación de los recursos hídricos.

Desde una perspectiva de conservación, se proponen varias especies de arbustos y árboles como

candidatas para objetivos de conservación debido a su rareza, grado de amenaza, sobreexplotación o endemismo. Dos especies -*Greigia stenolepis* y *Passiflora tripartita*- están documentadas bajo el estado de conservación de Menor Preocupación (LC), aunque se clasifican como que tienen algún nivel de amenaza (Morales, 2001).

Tabla 1. Uso etnobotánico de familias y especies con frutos comestibles del páramo del corredor occidental Guantiva-La Rusia, Boyacá.

Nombre común	Familia	Nombre científico	Usos etnobotánicos
Piñuela, piña de páramo	Bromeliáceas	<i>Greigia stenolepis</i> L.B.Sm.	Frutos de baya; semillas comestibles, preparación de jugos, uso medicinal laxante.
Papayuela	Caricaceae	<i>Vasconcellea pubescens</i> (A.DC.) Badillo	Fruta utilizada como alimento; preparada de varias maneras, incluyendo aguas aromáticas, conservas y producción de papaína.
Guatila	Cucurbitáceas	<i>Sechium edule</i> (Jacq.) Sud.	Se usa como verdura; frutas comestibles y otras partes. Potencial fitoterapéutico como agente antibacteriano.
Uva anís	Ericaceae	<i>Cavendishia bracteata</i> (Ruiz & Pav. ex J. St.-Hil.) Hoerold	Frutas utilizadas para comida, dulces y mermeladas.
Uva Camarera	Ericaceae	<i>Macedonia rupestris</i> (Kunth) A.C. Smith	Frutas utilizadas para alimentos, dulces, vino, mermeladas, aplicaciones medicinales y culinarias.
Uva	Ericaceae	<i>Macleania pubiflora</i> Benth.	Fruta comestible.
Uva pequeña	Ericaceae	<i>Cavendishia pubescens</i> (Kunth) Hemsl	Fruta comestible, uso potencial en la industria alimentaria y cosmética.
Uva páramo	Ericaceae	<i>Disterigma alaternoides</i> (Kunth) Nied	Fruta comestible.
Uva	Ericaceae	<i>Psammisia macrophylla</i> . (Kunth) Klotzsch.	Frutas comestibles.
Uva	Ericaceae	<i>Thibaudia floribunda</i> Kunth	Fruta comestible utilizada en jugos, dulces y mermeladas.
Uva	Ericaceae	<i>Gaylussacia buxifolia</i> Kunth.	Fruta comestible en jugos, dulces y mermeladas.
Pachim	Ericaceae	<i>Plutarchia coronaria</i> (Hook.fil.) A.C.Sm	Frutas utilizadas para jugo, jarabe y licor.
Agraz, Mortiño	Ericaceae	<i>Vaccinium floribundum</i> Kunth.	Fruta comestible, utilizada en jugos, dulces y mermeladas. Propiedades antioxidantes.
Páramo agraz	Ericaceae	<i>Vaccinium meridionale</i> Swartz	Frutas utilizadas para jugos, mermeladas, salsas y vinos. Antioxidantes presentes.
Reventadera	Ericaceae	<i>Pernettya prostrata</i> (Cav.) DC.	Planta medicinal, fruta utilizada para tinturas, extractos etanólicos utilizados para propiedades antiinflamatorias, antioxidantes y antibacterianas.
Uva pequeña	Ericaceae	<i>Cavendishia nitida</i> (Kunth) A.C. Sm	Fruta comestible.

Uva	Ericaceae	<i>Cavendishia cordifolia</i> (Kunth) Hoerold	Fruta comestible, utilizada en mermeladas, vinos, néctares, zumos, dulces.
Camarera	Ericaceae	<i>Themistoclesia dependens</i> (Benth.) A.C. Sm.	Fruta comestible.
Uva Camarera	Ericaceae	<i>Psammisia graebneriana</i> Hoerold	Fruta comestible.
Barejón, uva pequeña	Grassulariaceae	<i>Ribes andicola</i> Jancz.	Fruta comestible, usada para hacer mermeladas, también usada para tratar afecciones no diagnosticadas.
Arrayán	Myrtaceae	<i>Myrcianthes rhopaloides</i> (Kunth) McVaugh	Frutas y hojas utilizadas para preparar la colada (bebida tradicional).
Arrayán silvestre	Myrtaceae	<i>Ugni myricoides</i> (Kunth) O.Berg	Las frutas silvestres son comestibles.
Arrayán blanco	Myrtaceae	<i>Myrcianthes leucoxylla</i> (Ortega) McVaugh	Fruta comestible
Curuba	Passifloraceae	<i>Passiflora tripartita</i> (Juss.) Poir.	Fruta y pulpa comestibles utilizadas en productos agroindustriales como bebidas, fermentos, helados y jugos.
Curuba	Passifloraceae	<i>Passiflora mollissima</i> (Kunth) L. H. Bailey.	Fruta y pulpa comestibles utilizadas en productos agroindustriales como bebidas, fermentos, helados y jugos.
Canelón	Piperaceae	<i>Peperomia subspathulata</i> Yunck.	Planta aromática; se usa en infusiones para el estómago, la cabeza, el dolor de dientes, los nervios, moretones, quemaduras. Planta entera utilizada como cataplasma, purgante y para la sordera.
Cereza	Rosáceas	<i>Prunus serotina</i> subsp. <i>capuli</i> (Cav.) McVaugh	Fruta comestible; utilizado para jugos, medicamentos, corteza, hojas y frutas tienen valor comercial. Expectorante, sedante, estimulante.
Uche, cerezo	Rosáceas	<i>Prunus buxifolia</i> Koehne	Las frutas son comestibles (semillas); se usa como alimento humano.
Mortiño	Rosáceas	<i>Hesperomeles goudotiana</i> (diciembre.) Killip.	Frutas utilizadas para zumos, mermeladas y vinos.
Mortiño	Rosáceas	<i>Hesperomeles heterophylla</i> (Ruiz & Pav.) Gancho	Frutas utilizadas para el consumo humano; zumos, mermeladas y vinos.
Blackberry	Rosáceas	<i>Rubus urticifolius</i> Poir.	Frutas utilizadas para jugos, mermeladas, medicinales y elaboración de vinos.
Mora de Castilla	Rosáceas	<i>Rubus bogotensis</i> Kunth	Frutas utilizadas para el consumo humano; zumos, mermeladas.
Morón	Rosáceas	<i>Rubus nubigenus</i> Kunth	Frutas utilizadas para el consumo humano; zumos, mermeladas.
Mora	Rosáceas	<i>Rubus robustus</i> C. Presl	Frutas utilizadas para el consumo humano; zumos, mermeladas.
Mora	Rosáceas	<i>Rubus compactus</i> Benth	Frutas utilizadas para el consumo humano; zumos, mermeladas.
Mora, morón	Rosáceas	<i>Rubus glaucus</i> Benth	Frutas utilizadas para el consumo humano; zumos, mermeladas, medicinas y vinificación.
Mortiño	Rosáceas	<i>Hesperomeles ferruginea</i> (Kunth) Lindl.	Frutas utilizadas para el consumo humano; zumos, mermeladas.

Fresa nativa	Rosáceas	<i>Fragaria vesca</i> L.	Fresa silvestre utilizada para alimentos, jugos, mermeladas, medicamentos; bebida alcohólica hecha con aguardiente.
Rojitos, pingüinos	Rubiáceas	<i>Nertera granadensis</i> (Mutis ex L. f.) Druce	Fruta utilizada como alimento, medicinal, utilizada para tratar afecciones cardíacas
Lulo nativo	Solanáceas	<i>Solanum quitoense</i> Lam.	Fruta utilizada en bebidas tradicionales como canelazo, colada morada y chicha.
Goldenberry	Solanáceas	<i>Physalis peruviana</i> L.	Alimentos y laxantes; apoya la salud ósea y del cartílago, previene enfermedades como la osteoporosis; utilizado en bebidas tradicionales.
Tomatillo	Solanáceas	<i>Solanum sisymbriifolium</i> LAM.	Fruta madura comestible en varias preparaciones; medicinales; el extracto etanólico tiene efectos genotóxicos
Mashua	Tropeliaceae	<i>Tropaeolum tuberosum</i> Ruiz y Pavón	Se utiliza en la cocina tradicional de las tierras altas; uso medicinal para enfermedades hepáticas y renales.
Vid	Vitaceae	<i>Cissus alata</i> Jacq.	Frutas verdes estofadas como vegetales; uso medicinal para moretones y hematomas
Ají de páramo, canela	Winteraceae	<i>Drimys granatensis</i> Mutis ex L.f	Fruta picante utilizada en los alimentos; los usos tradicionales incluyen como laxante, menagoga y antihelmíntico

En comparación, el trabajo de González (2014), *Guía ilustrada de las plantas del municipio de Villa de Leyva y sus alrededores*, es muy completa, enumerando 1.293 especies de plantas vasculares autóctonas y otras especies exóticas cultivadas con fines comestibles u ornamentales. La lista actual comparte aproximadamente el 90% de sus especies con el trabajo de González, además de aportar nuevos registros y usos etnobotánicos relevantes para la región de la Cordillera Oriental.

Como resultado del inventario, se documentaron más de 15 especies de árboles (Figura 1), incluyendo *Hesperomeles goudotiana* y *Hesperomeles heterophylla* (comúnmente conocido como mortiño), *Myrcianthes leucoxylla* (arrayán), y *Prunus serotina* (cereza). También se registraron especies de arbustos como *Macleania rupestris* y *Macleania pubiflora* (uva camarona Ver Figura 2) especies investigadas Acero and Bernal (2003), *Cavendishia pubescens* (uvita), y otros arbustos frutales como *Disterigma alaternoides*, *Psammisia macrophylla*, *Thibaudia floribunda*, *Gaylussacia buxifolia*, *Plutarchia coronaria*, *Vaccinium floribundum* y *Vaccinium meridionale* (agraz o mortiño), *Pernettya prostrata* (reventadera), así como varias especies de *Rubus* (*R. urticifolium*, *R. bogoten-*

sis, *R. nubigenus*, *R. robustus*, todas conocidas como moras silvestres). Además, especies como *Vasconcellea pubescens* (papayuela), *Solanum quitoense* (lulo silvestre), *Physalis peruviana* (uchuva), *Solanum sisymbriifolium* (tomatillo), *Passiflora tripartita* (curuba) considerado un promisorio cultivo (Casierra-Posada et al., 2017), *Cissus microcarpa* (una liana frutal), *Sechium edule* (chayote, guatila), *Ribes andicola* (barito de la familia Grossulariaceae), y se incluyeron *Greigia stenolepis* (piñuela de la familia Bromeliaceae).

Este proceso también implicó el aprendizaje de técnicas relacionadas con la recolección de frutos, la escarificación y preparación de semillas, la construcción de germinadores y la propagación sexual y asexual (por ejemplo, estacas de tallos), específicamente para especies como *Drimys granadensis* (ají de páramo), *Peperomia subspathulata* (canelón) y *Tropaeolum tuberosum* (cubio, mashua).

La presencia de 15 especies de la familia Ericaceae, cuyos frutos, en particular los de los géneros *Macleania*, *Cavendishia*, *Disterigma*, *Plutarchia*, y *Vaccinium*, son consumidos, ilustra una notable diversidad de plantas comestibles con una larga tradición

de uso en la región de Duitama. Esta práctica cultural está estrechamente vinculada a las tradiciones de las comunidades páramo, como también lo documentan en Perú investigadores como Huamantupa-Chuquimaco et al. (2021). En Colombia, estas espe-

cies, comúnmente conocidas como *uva camarona* o *uva de monte*, están siendo estudiadas por su potencial de producción de pulpa y transformación en productos de valor agregado como mermeladas y conservas.

Registro de familias con diversidad de géneros y especies con frutos alimenticios páramo en Boyacá

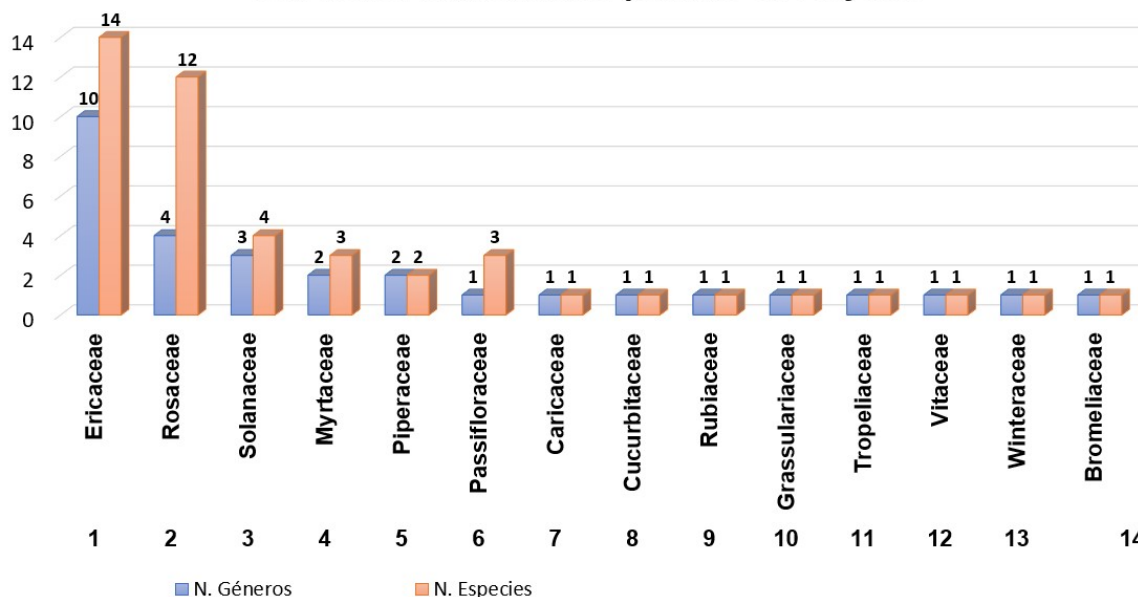


Figura 1. Registro de familias de plantas con diversidad de géneros y especies frutales comestibles en el páramo del corredor occidental, Complejo Guantiva-La Rusia -Boyacá.

En el estudio de especies frutales comestibles de diversas familias (Tabla 1), las investigaciones de Coimbra-Molina (2014) coinciden con lo realizado en el corredor occidental del páramo Guantiva-La Rusia en Boyacá, se encontró que la cubierta vegetal soporta una alta diversidad vegetal. Esto incluye arbustos, árboles y especies herbáceas distribuidas en 14 familias botánicas. La familia Ericaceae presentó la mayor diversidad genérica con 14 especies en 10 géneros; coinciden con investigaciones de Castro et al. (2023). Seguida por Rosaceae con 12 especies y 4 géneros, Solanaceae con 4 especies y 3 géneros, y Myrtaceae y Passifloraceae con 2 especies cada uno, mismos que son potenciales según Rodríguez-Castillo and Melgarejo (2015). Otras ocho familias estaban representadas por un género y una especie cada una. Estos hallazgos se alinean con la investigación previa de Rangel (2000) sobre la diversidad

vegetal en Colombia, particularmente en zonas altoandinas y ecosistemas de páramo seco a subhúmedo, donde las ericáceas y las rosáceas dominan debido a su alto número de géneros y especies (Fischer et al., 2022).

Las familias Ericaceae y Rosaceae representan los grupos más diversificados de plantas originarias del Neotrópico (Kron et al., 2002). Su diversificación está estrechamente relacionada con hábitats específicos que requieren condiciones abióticas distintas que cambian rápidamente a lo largo de gradientes altitudinales. Estas condiciones incluyen variaciones en la disponibilidad de nutrientes del suelo, regímenes de precipitación, humedad, temperatura, fotoperíodo y contenido de agua del suelo, todos los cuales están interrelacionados con sus dispersores de semillas y polinizadores (Cáceres et al., 2014).

En términos de las familias registradas y la diversidad de especies, la distribución se representa como porcentajes de la muestra total. Las plantas con frutos de valor alimentario en el páramo (Quevedo-Rubiano et al., 2021) están dominadas por la familia Ericaceae, que comprende el 33%, seguida por Rosaceae en el 24%, Solanaceae en el 9%, Myrtaceae y Passifloraceae en el 7% cada una, y Piperaceae en el 4%. Otras ocho familias -Bromeliaceae, Grossulariaceae, Caricaceae, Cucurbitaceae, Rubiaceae, Tropaeolaceae, Winteraceae y

Vitaceae- están representadas por el 2% de las especies (Ver Figura 1).

Además, se confirmó que varias de estas especies juegan un papel importante en la conservación de microcuencas, como se observa en Río de Piedras en Cóbbita, Río Sotaquirá y Río Surba en Duitama, Boyacá. La Figura 2 muestra un ejemplo del Diseño de un Catálogo de Frutas Silvestres como Estrategia Educativa.



Figura 2. Fotografía y descripción de la Uva Camarona y sus usos.

4 Conclusiones

Con base en el trabajo realizado, se puede afirmar que el páramo bajo estudio funciona como un corredor biológico con alto potencial para la biodiversidad nativa de frutas, especialmente cuando se compara con otras áreas altoandinas en Colombia. Entre las familias de plantas registradas, Ericaceae y Rosaceae son las más destacadas, ambas con una significativa diversidad de frutos comestibles (Diago and Castro, 2021), con diversas aplicaciones etnobotánicas.

Las comunidades rurales de la región cuentan

con una amplia base de conocimientos pluriculturales. A través del diálogo con estas comunidades, se estableció que los usos etnobotánicos son manejados y transmitidos principalmente por mujeres (70%), que también son las principales usuarias de frutas silvestres de arbustos y árboles, como el agraz (*Vaccinium meridionale*) igual aporte de Becerra et al. (2022), el lulo (*Solanum quitoense*), la uva anís (*Cavendishia bracteata*), curuba (*Passiflora sppmollissima*), la cereza (*Prunus sppserotina subsp -capulí-*), el pachín (*Plutarchia coronaria*) y mortiño (*Hesperomeles heterophylla*)— principalmente para la preparación de jugos y mermeladas. En contraste,

los hombres (30%) tienden a utilizar estas mismas plantas y otros árboles para la construcción de cercas vivientes.

Finalmente, es crucial implementar programas de educación comunitaria y organizar grupos locales de tutela de páramo para asegurar la conservación, diversificación y uso sostenible de los productos y subproductos de páramo, manteniendo así la biodiversidad para las generaciones presentes y futuras.

Agradecimientos

Expresamos nuestro sincero agradecimiento a las juntas comunitarias de Cómbita, la Junta Administradora del Acueducto Río de Piedras en Sotaquirá, la Fundación Ecoam y la junta comunitaria de Vereda Los Medios en el municipio de Paipa y Palermo. También agradecemos a la Fundación Tibairá - Duitama, Julián Barbosa y Cristina Arias del Grupo de investigación MICRAM Uptc. Al Profesor Javier Molano Malaver, José Fernando Ramírez Bermúdez, y a la comunidad rural de Vereda La Quinta y Santana, Duitama-Boyacá.

Contribución de los autores

M.G.C.: Conceptualización, tratamiento de datos Investigación, Metodología, borrador original, Escritura- revisión y edición. M.T.T.: Conceptualización, Investigación, Metodología Administración de proyecto, Escritura- borrador original, Escritura- revisión y edición.

Referencias

- Acero, L. and Bernal, H. (2003). *El cultivo, aprovechamiento y conservación de la uva camarona* *Maclanea rupestris (H.B.K) AC, Smith*. Convenio Andrés Bello. Online: <https://n9.cl/ks1y8>.
- Aguilera-Arango, G., Lombo-Ortiz, D., Burbano-Eraza, E., and Orduz-Rodriguez, J. (2020). Productivo: revisión y situación en Colombia. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 27(23).
- Alvarado, L. and García, M. (2008). Características más relevantes del paradigma socio-crítico: su aplicación en investigaciones de educación ambiental y de enseñanza de las ciencias realizadas en el doctorado de educación del instituto pedagógico de Caracas. *Sapiens. Revista Universitaria de Investigación*, 9(2):187–202. Online: <https://n9.cl/i6vmz>.
- Becerra, A. D., Quevedo-Rubiano, S., Magnitskiy, S., and Lancheros, H. (2022). Respuestas morfológicas de plantas de arándano andino (*Vaccinium meridionale swartz*) que crecen en tres ambientes a diferentes altitudes. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 16(3):e15034. Online: <https://n9.cl/4quulq>.
- Casierra-Posada, F., Lancheros-Olmos, J., and Cutler, J. (2017). Crecimiento y caída de frutas en plantaciones de maracuyá (*Passiflora tripartita* var. *mollissima*). *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 11(2):237–246. Online: <https://n9.cl/g7pdn>.
- Castro, N., Archila, E., and Bonilla, A. (2023). *Eri-cáceas* con frutos comestibles en Colombia. *Biota Colombiana*, 24(2):e1083–e1083. Online: <https://bit.ly/4mwMO3J>.
- Cáceres, Y., Llambí, L., and Rada, F. (2014). Shrubs as foundation species in a high tropical alpine ecosystem: a multi-scale analysis of plant spatial interactions. *Plant Ecology & Diversity*, 8(2):147–161. Online: <https://bit.ly/3JkRuLo>.
- Coimbra-Molina, D. J. (2014). *Guía de Frutos Silvestres Comestibles de la Chiquitania*. Edición Fundación para la Conservación del Bosque Chiquitano (FCBC). Online: <https://n9.cl/33bkn>.
- Creswell, J. (2013). *Capítulo 7: Data Collection*, pages 145–177. Sage Publications. Online: <https://n9.cl/nq2u5>.
- Cronquist, A. (1981). *An Integrated System of Classification of Flowering Plants*. Columbia University Press. Online: <https://n9.cl/ckhkm>.
- Diago, D. and Castro, N. (2021). Frutos silvestres comestibles de Colombia: diversidad y perspectivas de uso. *Biota Colombiana*, 22(2):16–55. Online: <https://bit.ly/4mwMO3J>.
- Fischer, G., Parra-Coronado, A., and Balaguera-López, H. (2022). La altitud como determinante de la calidad de la fruta con énfasis en el trópico andino de Colombia. Una revisión. *Agronomía*

- Colombiana, 40(2):212–227. Online: <https://n9.cl/gcatg>.
- Galvis-Rueda, M. and Torres-Torres, M. (2017). Etnobotánica y usos de las plantas de la comunidad rural de sogamoso, boyacá, Colombia. *Revista De Investigación Agraria Y Ambiental*, 8(2):187–206. Online: <https://n9.cl/x2618>.
- González, F. (2014). *Villa de Leyva Florece: Guía Ilustrada de las plantas de Villa de Leyva y alrededores*. Panamericana Formas e Impresos S.A. Online: <https://n9.cl/jr1yn>.
- Hernández-Sampieri, R. and Mendoza, C. (2018). *Metodología de la investigación. Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. Mc Graw Hill Education. Online: <https://n9.cl/6e52k>.
- Hofstede, R., Segarra, P., and Mena, P. (2003). *Los páramos del mundo. Proyecto Atlas Mundial de los páramos*. Global Peatland Initiative, NC-UICN y EcoCiencia. Online: <https://n9.cl/ts3or1>.
- Huamantupa-Chuquimaco, I. R., Urrunaga-Soria, R., and Tupayachi-Herrera, A. (2021). Diversidad de ericáceas con frutos comestibles, potencialidades para su manejo y estado de conservación en la región del Cusco, Perú. *Q'EUÑA*, 9(1):7–24. Online: <https://n9.cl/pk8y9>.
- Kemmis, S. and McTaggart, R. (1988). *Cómo planificar la investigación-acción*. Editorial Laertes. Online: <https://n9.cl/cfr2e>.
- Kron, K. A., Powell, E. A., and Luteyn, J. L. (2002). Relaciones filogenéticas dentro de la tribu del arándano (*Vaccinieae*, *Ericaceae*) basadas en datos de secuencias de matk y regiones ITS ribosomales nucleares, con comentarios sobre la ubicación de *Satyria*. *American Journal of Botany*, 89(2):327–336. Online: <https://n9.cl/v0mww>.
- Latorre, A. (2003). *La investigación-acción. Conocer y cambiar la práctica educativa*. Editorial Graó, de IRIF, S.L. el Francesc Tarrega.
- Lieber, E. and Weisner, T. (2010). *Meeting the practical challenges of mixed methods research*. SAGE Publications, Inc. Online: <https://n9.cl/8y0c0>.
- Morales, J. F. (2001). *Orquídeas, cactus y bromelias del bosque seco*. Instituto Nacional de Biodiversidad. Online: <https://bit.ly/3UvryiB>.
- Parada-Quintero, M., Alarcón-Jiménez, D., and Rosero-Lasprilla, L. (2012). Fenología de la floración de especies ornitófilas del estrato inferior en dos hábitats altoandinos en la ranchería municipal parque natural (Paipa-Boyacá-Colombia). *Caldasia*, 34(1):139–154. Online: <https://n9.cl/zr4zm3>.
- Quevedo-Rubiano, S., Aranda-Camacho, Y., Ligarreto-Moreno, G., and Magnitskiy, S. (2021). Caracterización del sistema agroalimentario localizado (SYAL) para el arándano andino (*Vaccinium meridionale* Swartz) en el Departamento de Boyacá, Colombia. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 15(1):e11593. Online: <https://n9.cl/n9wb7u>.
- Rangel, J. e. (2000). *Colombia Diversidad Biótica III La región de vida paramuna*. Universidad Nacional de Colombia. Online: <https://n9.cl/tl3e9>.
- Rangel, O. and Velázquez, A. (1997). *Métodos de estudio de la vegetación*, pages 59–87. Universidad Nacional de Colombia. Online: <https://n9.cl/fclsqd>.
- Rodríguez, C., Lorenzo, O., and Herrera, L. (2005). Teoría y práctica del análisis de datos cualitativos. proceso general y criterios de calidad. *Revista Internacional de Ciencias Sociales y Humanidades, SOCIOTAM*, 15(2):133–154. Online: <https://n9.cl/jt4x4>.
- Rodríguez-Castillo, N. and Melgarejo, L. (2015). *Caracterización ecofisiológica de la granadilla (Passiflora ligularis Juss) bajo condiciones dos ambientales en el departamento del Huila*, pages 17–52. Online: <https://n9.cl/cx7tp>. Universidad Nacional de Colombia.
- Sanjinés, A. and Øllgaard, B. y Balslev, H. (2006). *Frutos comestibles*, pages 329–346. Universidad Mayor de San Andrés, La Paz. Online: <https://n9.cl/1k2tk>.
- Sánchez, H., Sánchez-Garzón, N., Nesbitt, M., Ávila, F., and Diazgranados, M. (2021). Enviados directo a Londres: objetos colombianos en la Colección de Botánica Económica del Real Jardín Botánico de Kew. *Apuntes: Revista de estudios sobre patrimonio cultural*, 34(2):28–28. Online: <https://bit.ly/45m4k4E>.



ANÁLISIS DE LOS DESAFÍOS DE SOSTENIBILIDAD EN SISTEMAS DE RIEGO DE LOS ANDES

UNDERSTANDING SUSTAINABILITY ISSUES IN ANDEAN IRRIGATION SYSTEMS

Gina Berrones* y Rolando Célleri

Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales, Universidad de Cuenca. 010150, Cuenca, Ecuador. [https://ror.org/04r23zn56]

*Autor para correspondencia: ginaberrones@gmail.com

Manuscrito recibido el 31 de julio de 2024. Aceptado, tras revisión el 20 de junio de 2025. Publicado el 1 de septiembre de 2025.

Resumen

La agricultura de regadío consume aproximadamente 70% del agua dulce mundial, por lo que resulta necesario asegurar un suministro sostenible. Se requieren estrategias para el uso sostenible del agua, que incorporen avances técnicos, agronómicos e institucionales, especialmente en países en desarrollo en los Andes, donde la agricultura es crucial para el crecimiento socioeconómico. La identificación de temas relacionados con la sostenibilidad en sistemas de riego es esencial, pero la información existente es limitada, ya que la mayoría de los estudios se centran en pocos sistemas. Se analizaron los datos de encuestas realizadas en el 2022 por el Gobierno Provincial del Azuay, Ecuador, con representantes de juntas de riego. También, se adaptó la metodología del Informe Mundial sobre el Desarrollo del Agua 2023 para evaluar estos sistemas, considerando los factores socioeconómicos, recursos hídricos, usuarios y gobernanza. Nuestro estudio incluyó 235 sistemas de riego con áreas irrigadas que varían de 0,5 a 2400 hectáreas, clasificados en cuatro grupos: (a) micro (<10 ha), (b) pequeño (10-100 ha), (c) mediano (100-500 ha) y (d) grande (>500 ha). Los problemas más urgentes identificados incluyen la asignación de agua no proporcional al área irrigada, la producción agrícola que ya no es la principal fuente de ingresos, el incumplimiento de reglamentos y el pago de tarifas. La mayoría de estos problemas se deben a una gobernanza débil. Nuestros hallazgos destacan la complejidad de los sistemas de riego y las barreras para su desarrollo. Este análisis integral proporciona ideas para políticas efectivas y enfatiza la importancia de evaluaciones regulares, que deben incluir monitoreo sistemático, recolección de datos y desarrollo de indicadores.

Palabras clave: Asignación de agua, Gobernanza, Tomadores de decisiones, Juntas de riego, Agricultura de regadío.

Abstract

Irrigated agriculture consumes approximately 70% of the world's freshwater, making sustainable water delivery imperative. Strategies for sustainable water use, incorporating technical, agronomic, managerial, and institutional advancements are urgently needed, especially in developing countries such as those in the Andes, where agriculture is crucial for socioeconomic growth. Identifying the main issues related to sustainability of irrigation systems are essential, but limited information exists, as most studies focus on small groups of systems rather than a diverse range. To address this, we analyzed data from surveys conducted in 2022 by the Regional Government of Azuay, Ecuador, with representatives of water user associations. We adapted the methodology outlined in the United Nations World Water Development Report 2023 to evaluate these mountain irrigation systems, considering socioeconomic, water resources, users and governance factors. Our study included 235 irrigation systems with irrigated areas ranging from 0.5 to 2400 hectares, classified into four groups: (a) micro (<10 ha), (b) Small (10-100 ha), (c) Medium (100-500 ha), and (d) large (>500 ha). The most urgent issues identified include water allocation not proportional to the irrigated area, agricultural production no longer being the primary source of income, and non-compliance with management rules and fee payments. Most of the issues are due to weak governance. Our findings highlight the complexity of irrigation systems and the barriers to their development. This comprehensive analysis provides insights for building effective policies and emphasizes the importance of regular assessments, which should include systematic monitoring, data collection, and the development of performance indicators.

Keywords: Water allocation, Governance, Decision-makers, Water User Associations, Irrigated agriculture.

Forma sugerida de citar: Berrones, G. y Céleri, R. (2025). Análisis de los Desafíos de Sostenibilidad en Sistemas de Riego de los Andes. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*. Vol. 42(2):22-40. <https://doi.org/10.17163/lgr.n42.2025.02>.

IDs Orcid:

Gina Berrones: <https://orcid.org/0000-0001-5270-1771>

Rolando Céleri: <https://orcid.org/0000-0002-7683-3768>

1 Introducción

Los recursos hídricos no sólo son esenciales para sostener diversos sectores de la sociedad, como la producción de alimentos, la generación de energía y el suministro de bienes y servicios, sino que también sirven como motores económicos en muchas regiones (Sauer et al., 2010; United Nations, 2021). Más allá de su necesidad, la importancia del agua se ha convertido en un factor fundamental que influye en las actividades económicas y en el desarrollo general de la sociedad. En particular, es importante la forma en que la agricultura utiliza los recursos de agua dulce para garantizar la disponibilidad en diversos sectores y salvaguardar los ecosistemas (FAO, 2020). La agricultura es el mayor consumidor de agua a nivel mundial, pues utiliza aproximadamente el 70% del agua total extraída para fines de riego (United Nations, 2021; Wada et al., 2016; Wisser et al., 2008), lo que pone de manifiesto la necesidad de estrategias de gestión eficaces, especialmente en los países en desarrollo donde la agricultura es fundamental para el crecimiento socioeconómico (Li et al., 2020), como en los Andes.

Además, se considera que la agricultura tiene el valor añadido más bajo a nivel mundial, sobre todo en los países con ingresos bajos y medios (United Nations, 2021), lo que subraya los retos a los que se enfrenta la optimización de sus contribuciones económicas. Por lo tanto, surge la preocupación por la mejora de la productividad del agua para uso agrícola al tiempo que se garantiza la seguridad alimentaria (Bjornlund et al., 2023), sobre todo a la hora de apoyar a los agricultores que dependen en gran medida de la agricultura de regadío para su subsistencia (United Nations, 2023). El regadío se muestra como un motor importante del aumento del rendimiento y ha desempeñado un papel esencial a la hora de facilitar los incrementos sustanciales de la producción (Alexandratos and Bruinsma, 2012), subrayando así su importancia en el desarrollo agrícola.

Para lograr una gestión sostenible del riego se necesita contar con estrategias integrales que abarquen dimensiones técnicas, agronómicas, de gestión e institucionales (Gutierrez et al., 2014; Sirimevan et al., 2021a). Los sistemas de riego involucran a múltiples actores que requieren interacciones entre las partes interesadas para lograr su plena

funcionalidad (van Rooyen et al., 2017). Además, el regadío exige amplias infraestructuras y conocimientos para facilitar el acceso al agua, su almacenamiento y su transporte a los sistemas, garantizando al mismo tiempo una distribución equitativa a los campos de los agricultores y las necesidades medioambientales (Parry et al., 2020). La gestión eficaz de los recursos hídricos, la distribución, los derechos y las operaciones de mantenimiento implican tanto a las comunidades locales como a los marcos institucionales (van Rooyen et al., 2017).

La cooperación social dentro de las comunidades desempeña un rol clave en la gestión sostenible del riego. Históricamente, los sistemas de riego gestionados por comunidades en los Andes han demostrado la eficacia de la acción colectiva y la colaboración (Hoogesteger, 2015). Este es el caso de las Asociaciones de Usuarios de Agua (AUA), que gestionan los recursos de riego a través de enfoques participativos y han surgido como facilitadores significativos de la acción colectiva, movilizándolo a las comunidades hacia objetivos comunes (Hoogesteger, 2013, 2015). Por lo tanto, hay que establecer una cooperación participativa entre las partes interesadas para facilitar la gobernanza del agua y los procesos de toma de decisiones (FAO, 2016; United Nations, 2023).

Las AUA suelen enfrentarse a problemas como estrategias de implementación inadecuadas y una delimitación poco clara de funciones y responsabilidades, entre otros (United Nations, 2023). Estos obstáculos pueden impedir de forma significativa el funcionamiento eficaz de las AUA y socavar su capacidad para alcanzar objetivos de gestión sostenible del riego. Uno de los principales problemas es la falta de datos e información; sobre todo en los aspectos relacionados al funcionamiento, la gestión y el impacto de los sistemas de riego, incluido el bienestar de los agricultores. Solo existen escasos estudios sobre la gestión del riego y el desarrollo socioeconómico en los Andes. Communal et al. (2016) y Hoogesteger (2013) examinaron los cambios en la gestión de la distribución del agua entre los pequeños agricultores y analizaron la cooperación comunitaria en la gestión de los sistemas de riego en el norte de los Andes ecuatorianos, haciendo hincapié en la importancia de las iniciativas locales y el compromiso de la comunidad en las prácticas de gestión sostenible de los recursos hídricos. Mien-

tras tanto, Gutierrez et al. (2014) y Leroy et al. (2022) proporcionaron perspectivas más amplias sobre el desarrollo agrícola de regadío y los cambios institucionales dentro de las AUA en la región andina. Leroy (2019) se centró en la percepción de las causas socioeconómicas de la escasez de agua dentro de las AUA en los páramos de Colombia y Venezuela. En conjunto, estos estudios destacan la necesidad de enfoques integrados que consideren tanto los contextos locales como los marcos institucionales más amplios.

La mayoría de los estudios existentes en los Andes se han centrado en uno o en pequeños grupos de sistemas de riego, lo que dificulta la comprensión de la organización, la funcionalidad y la sostenibilidad del riego en la región, especialmente dadas las grandes variaciones en la superficie regada y en el número de usuarios de esos sistemas. Hay poca información sobre las condiciones físicas actuales de los sistemas de riego, la coordinación entre usuarios y administración, el funcionamiento y mantenimiento de los sistemas, el impacto de las sequías y el efecto del riego en los medios de subsistencia de los usuarios. Por lo tanto, hay que resolver este vacío de información para desarrollar estrategias globales de gestión sostenible del regadío en la región.

Hasta donde sabemos, ningún estudio se ha centrado en estudiar una amplia gama de sistemas de riego y en cómo los gestionan las AUA. Por lo tanto, el objetivo de esta investigación es analizar e identificar los principales problemas de sostenibilidad a los que se enfrentan los usuarios dentro de una amplia muestra de sistemas de riego de montaña, con el objetivo de proporcionar información relevante a los responsables de la toma de decisiones para que puedan intervenir con conocimiento de causa.

Adaptamos la metodología descrita en el Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo 2023 (United Nations, 2023), que ofrece una categorización exhaustiva de los factores que influyen en el rendimiento de las AUA y el nivel de cooperación entre las partes interesadas que participan en los sistemas de riego. Aunque el alcance de este estudio no es evaluar el rendimiento de las AUA per se, utilizamos este marco de categorización para examinar críticamente la gestión y la sostenibilidad de los

sistemas de riego. Tuvimos en cuenta los siguientes factores: condiciones socioeconómicas, recursos hídricos, gobernanza y dinámica de los usuarios. Nuestro análisis se basa en un conjunto de datos obtenidos por el Gobierno Regional del Azuay mediante encuestas realizadas en 2022 a representantes de 235 AUA de toda la provincia, en el sur de los Andes ecuatorianos.

2 Materiales y Métodos

2.1 Región de estudio: Sistemas de riego en zonas de montaña de Azuay

La provincia de Azuay, ubicada en el sur de Ecuador, abarca dos zonas: la región interandina, limitada por las cordilleras andinas occidental y oriental, y la región costera occidental (Tenesaca et al., 2017). Con una superficie de 8 309,6 km², Azuay presenta una importante diversidad bioclimática, que se traduce en siete zonas bioclimáticas distintas. Estas incluyen ecosistemas como los pastizales de páramo, los bosques montanos siempreverdes y las zonas influenciadas por las actividades humanas (Tenesaca et al., 2017). El clima regional está marcado por una variabilidad considerable. Las investigaciones en la cuenca del Paute demuestran diferencias espacio-temporales significativas, particularmente en la precipitación, donde los totales medios anuales varían desde aproximadamente 660 mm en los valles interandinos hasta más de 3400 mm en las laderas de la cordillera oriental que reciben una humedad amazónica sustancial (Celleri et al., 2007). La temperatura también muestra una variación significativa con la altitud y la exposición, creando diversas condiciones térmicas desde páramos fríos y húmedos hasta valles más bajos más templados (Camposano et al., 2016; Celleri et al., 2007).

El territorio provincial se caracteriza predominantemente por fuertes pendientes que limitan la mecanización agrícola, en particular debido a los problemas de riego. Existen riesgos de erosión hídrica y eólica, así como de movimiento de masas de suelo. Menos del 15% del territorio provincial consiste en llanuras y colinas onduladas, que generalmente están libres de piedras y son adecuadas para diversos tipos de mecanización agrícola, con algunas restricciones (GPA, 2018).

Las zonas rurales del Azuay se caracterizan por su economía agrícola y ganadera (GPA, 2018). En Azuay, las prácticas agrícolas están enfocadas principalmente al autoconsumo y frecuentemente se combinan con otras actividades no agrícolas (GPA, 2019). El III Censo Nacional Agropecuario destaca el cultivo de diversos rubros en Azuay, entre ellos el cultivo en asociación de maíz y fréjol, papa, haba, arveja, zanahoria y diversos frutales. Estas prácticas agrícolas utilizan en su mayoría métodos tradicionales con mínima implementación tecnológica (GPA, 2019). En términos de superficie cultivada, Azuay cubre aproximadamente 205 281 hectáreas dedicadas a la agricultura y la ganadería (ESPAC, 2023). Los sistemas de riego en la provincia son públicos, comunitarios y privados, que en muchos casos son administrados por las AUA.

2.2 Fuente de datos

Los datos utilizados en este estudio se obtuvieron del inventario de sistemas de riego realizado por el Gobierno Provincial del Azuay en 2022. Antes de este inventario, la información disponible sobre los sistemas de riego en la provincia se encontraba dispersa en diversas fuentes e instituciones guber-

namentales, por lo que no se contaba con un conjunto de datos consolidado, completo y coherente. En consonancia con los objetivos estratégicos del plan provincial de riego, se emprendió la tarea de recopilación de datos para formular políticas que garanticen una gestión eficaz del agua destinada específicamente al regadío. Además, el diseño de la encuesta implicó la colaboración entre un equipo interdisciplinar del gobierno local, una organización no gubernamental, consultores y la Universidad de Cuenca.

Aunque se ha informado de la existencia de aproximadamente 400 sistemas de riego en la provincia, la información disponible se refiere únicamente a 267 sistemas de riego. Además, de estos 267 sistemas, 168 sistemas de riego han sido georreferenciados, como se muestra en la Figura 1. Surgieron algunos vacíos de información sobre diversos temas del cuestionario debido al limitado acceso a la información por parte de los encuestados y a problemas logísticos. Teniendo en cuenta estos factores, utilizamos específicamente un conjunto de datos de 235 sistemas de riego, lo que garantiza una base fiable para el análisis.

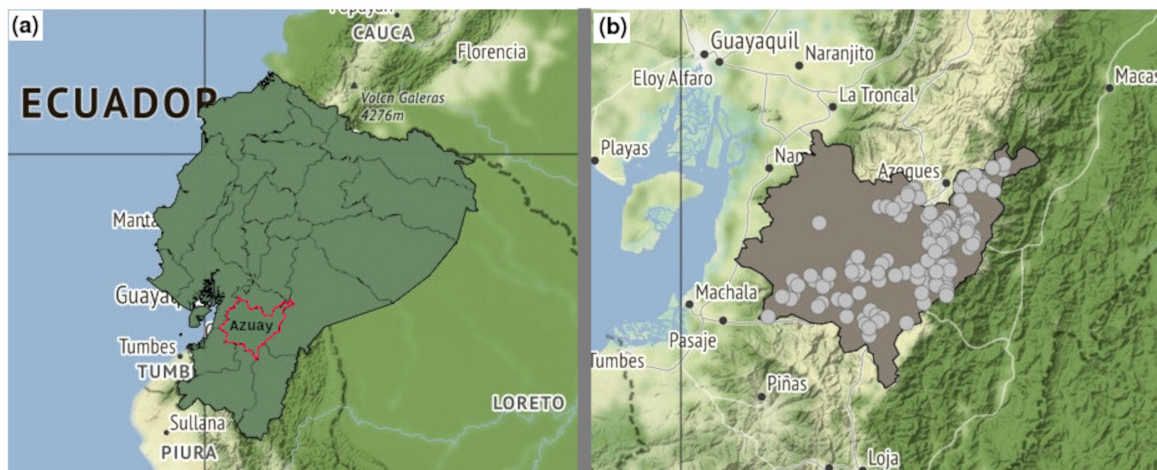


Figura 1. (a) Ubicación de la provincia de Azuay en Ecuador. (b) Sistemas de riego en la provincia de Azuay. Los puntos de color en el mapa indican la posición de 168 sistemas de riego georreferenciados.

La encuesta se dirigió a representantes de cada AUA. La recopilación de datos se llevó a cabo *in situ* utilizando la herramienta de recopilación de datos y encuestas de código abierto Kobo Toolbox

(www.kobotoolbox.org). Kobo Toolbox es una plataforma de uso mundial para la recopilación, gestión y visualización de datos, que facilita la recopilación de datos fuera de línea, incluso en lugares remotos

con conectividad limitada. Las encuestas incluían un extenso cuestionario de 400 preguntas que abarcaban 11 temas, incluida información general sobre la ubicación, el uso del agua, las infraestructuras, los aspectos operativos, la gestión socio-administrativa y las prácticas de riego predominantes.

2.3 Clasificación de los sistemas de riego

Para comprender los principales problemas a los que se enfrentan los usuarios de los sistemas de riego, clasificamos estos sistemas en cuatro grupos en función del tamaño de la superficie regada. Dado que las superficies de regadío pueden variar entre 0,5 ha y 2 400 ha, esta clasificación permitió analizar sistemas comparables y evaluar sus principales retos y puntos fuertes. Los sistemas de irrigación se clasificaron de la siguiente manera: a) Microsistemas, con un área irrigada inferior a 10 hectáreas; b) Pequeños sistemas, con un área de 10 a 100 hectáreas; c) Sistemas medianos, con 100 a 500 hectáreas; y d) Grandes sistemas, con un área irrigada superior a 500 hectáreas.

Se analizaron diversos aspectos relacionados con el regadío y se examinó el papel de las AUA para ofrecer una visión global de la sostenibilidad de los sistemas de riego. Este análisis incluyó la evaluación de la percepción de la calidad del agua, la asignación del agua, la distribución del agua, las fuentes de agua para la toma, problemas de infraestructura dentro de los sistemas de riego, el papel del operador, las tarifas del agua, los derechos sobre el agua y el establecimiento de juntas, entre otros. Comparando estos aspectos, identificamos áreas clave que requieren atención.

A partir de las respuestas a la encuesta, analizamos los principales retos a los que se enfrentan estos sistemas. Este estudio representa un primer intento de comprender el estado actual de los sistemas de riego y evaluar su sostenibilidad.

2.4 Asignación del agua y dependencia de las actividades agropecuarias

Algunos de los temas más importantes están relacionados con las diferencias en la distribución del agua, el número de usuarios/agricultores que tienen derechos de agua y el agua asignada a los sistemas. Estos temas surgen del hecho de que el

tamaño de las explotaciones puede variar mucho, desde parcelas muy pequeñas a grandes áreas; por lo tanto, se desconoce el número real de titulares de derechos de agua en cada sistema de riego y si existe una relación entre ellos y la asignación total de agua. Utilizamos gráficos de dispersión para examinar la relación entre el número de usuarios y el agua asignada en función de su superficie regada.

Para evaluar las posibles diferencias en la superficie de regadío por usuario y el caudal asignado por usuario entre las categorías de tamaño de los sistemas de riego, empleamos la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis. Se eligió este enfoque porque los datos violaban los supuestos de normalidad (prueba de Shapiro-Wilk, $p < 0,001$) y homogeneidad de varianzas (prueba de Levene, $p < 0,001$). Se realizaron comparaciones post-hoc por pares mediante la prueba de Dunn con corrección de Bonferroni para identificar diferencias específicas entre grupos, con una significancia estadística fijada en $\alpha = 0,05$. Además, exploramos posibles asociaciones entre variables clave (superficie regada, número de usuarios, coste de los derechos de agua, tarifas del agua) utilizando la correlación de rangos de Spearman.

Otra pregunta frecuente es cómo contribuyen la producción agrícola y ganadera de estos sistemas a la subsistencia de los agricultores. Para investigar la dependencia de los agricultores de estas actividades productivas para su subsistencia, empleamos gráficos de caja. Este enfoque nos permitió representar visualmente la variabilidad y el grado de dependencia de la agricultura y la ganadería en los distintos sistemas de riego.

2.5 Comparación de factores socioeconómicos, hídricos, de gobernanza y de usuarios entre sistemas de riego

Extrajimos los datos de las encuestas para estudiar las características y los factores que influyen en la funcionalidad de las AUA y en la sostenibilidad de los sistemas de riego, como se indica en el Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo 2023. La Tabla 1 ofrece una visión general y un resumen de la información extraída de las encuestas, que se analizó y comparó para cada categoría de sistema de riego (es decir, micro, pequeño, mediano y grande). Es

te análisis permite identificar las prioridades para abordar los temas relativos a la sostenibilidad de los sistemas de riego, que a su vez afectan a la seguridad alimentaria e hídrica.

Tabla 1. Factores que afectan a la sostenibilidad de los sistemas de riego. Modificado del Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo 2023.

Factor	Información
Socioeconómico	Cultivos principales, Producción para autoconsumo, Actividad productiva primaria, Mercados objetivo de venta, Valor añadido en los productos, Retos de comercialización, Pérdidas de producción asociadas a las prácticas de riego, Afiliación a organizaciones de productores rurales, Pérdidas de cosecha y transporte.
Recursos hídricos	Sistemas de riego situados por encima de los 3000 m s.n.m., Caudales, Método de riego, Sistemas de embalses, Estado de la infraestructura de riego, Conducción del agua, Frecuencia de mantenimiento, Calidad del agua, Reducción de los caudales de agua, Aumento de la frecuencia de sequías/inundaciones, Cambios en los turnos de agua en las estaciones secas.
Gobernanza	Tasas por uso del agua, Normas de distribución del agua, Financiación de proyectos de restauración, Tipo de organización, Situación jurídica, Derechos de agua, Apoyo y cooperación, Normativa.
Usuarios	Problemas en el sistema de riego, Funcionamiento y mantenimiento del sistema, Formación de operadores, Formación de otros usuarios, Capital social, Capacidades administrativas, de gestión y contabilidad.

3 Resultados y Discusión

3.1 Asignación del agua y dependencia de las actividades agropecuarias

La descarga de arroyos y ríos es la principal fuente de agua para el riego (71% de los sistemas), seguida de los manantiales (26%), los lagos (2%) y las aguas subterráneas (1%). Los sistemas más comunes son los comunitarios (90%), seguidos de los privados (7%) y los públicos (3%). La mayoría de los sistemas de riego son operados por AUA (78%) localmente llamadas "Junta de riego", que son organizaciones comunitarias sin fines de lucro encargadas de proporcionar servicios de riego y drenaje de acuerdo con el artículo 48 del Reglamento Ley Recursos Hídricos y Aprovechamiento del Agua (Correa, 2015). Las AUA coordinan la administración, operación y mantenimiento de los sistemas de riego. De acuerdo con la clasificación de los sistemas de riego, 62 sistemas medianos tienen el mayor número total de usuarios (8433). Los sistemas pequeños también tienen un número importante de usuarios (121 sistemas con 6781 usuarios). Por otro lado, sólo 11 grandes sistemas de riego atienden a un número importante de usuarios (5348). Por el contrario, hay 41 microsistemas con 1468 usuarios, lo que indica la prevalencia del minifundismo.

Encontramos una distribución desigual del agua entre los usuarios, independientemente de su superficie regada. De hecho, la gran dispersión de la Figura 2 ilustra la falta de relación entre la superficie de regadío por usuario y el caudal de agua asignado (l/s) por usuario. Esta disparidad es evidente en todas las categorías de sistemas, donde el número de usuarios varía desproporcionadamente para el mismo caudal de agua y el caudal asignado varía significativamente para el mismo número de usuarios. Algunos sistemas presentan una asignación de agua por hectárea muy baja, lo que los hace insostenibles. Esta situación puede deberse a diversos factores, como un aumento del número de usuarios tras la construcción del sistema o mediciones inexactas durante el estudio de asignación de agua. A la inversa, algunos sistemas tienen un caudal asignado superior al necesario. Es imperativo que las autoridades locales supervisen estos sistemas para solucionar la distribución desigual del agua entre los usuarios. La supervisión continua es esencial para garantizar la sostenibilidad de los sistemas.

La prueba de Kruskal-Wallis reveló diferencias significativas en el caudal asignado por usuario entre las categorías de tamaño de los sistemas de riego ($\chi^2 = 40,43$, $df = 3$, $p < 0,001$). Las pruebas post hoc de Dunn (corregidas por Bonferroni) indicaron

que los sistemas pequeños y micro diferían significativamente de los sistemas grandes y medianos ($p < 0,05$), mientras que no se encontraron diferencias significativas entre los sistemas grandes y medianos ($p = 0,489$). Del mismo modo, la superficie regada por usuario varió significativamente entre las categorías de sistemas ($\chi^2 = 112,97$, $df = 3$, $p < 0,001$). Las comparaciones post hoc mostraron que los usuarios de sistemas pequeños y micro te-

nían superficies regadas significativamente diferentes en comparación con los de sistemas grandes y medianos ($p < 0,001$), sin diferencias significativas entre sistemas grandes y medianos ($p = 0,9425$). Estos resultados indican que el tamaño del sistema de riego está significativamente asociado con la distribución por usuario tanto de la superficie regada como del agua asignada, lo que sugiere mayores disparidades en los sistemas más pequeños.

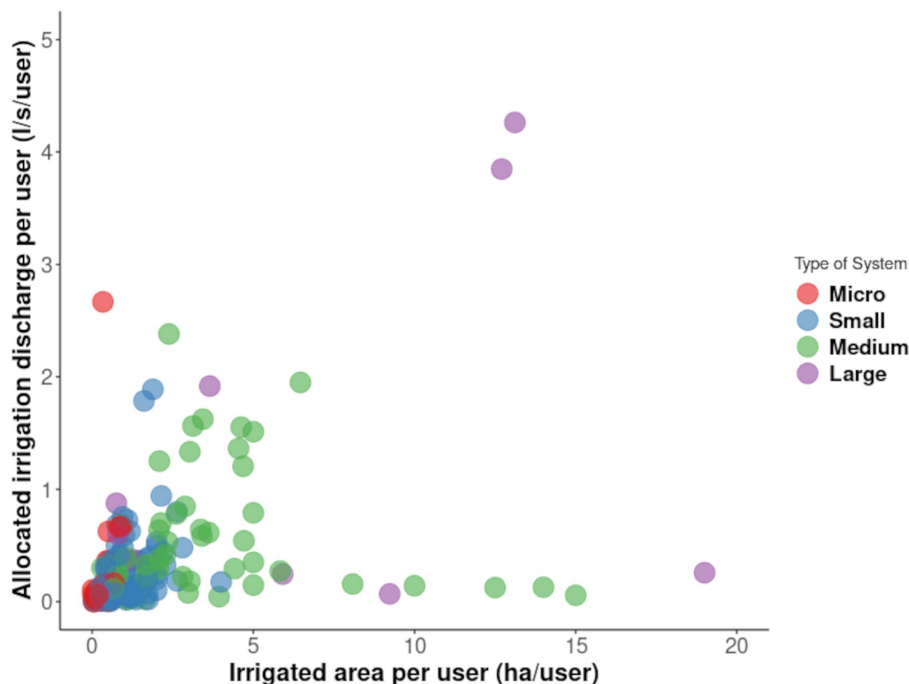


Figura 2. Relación entre la superficie regada (ha/usuario) y el caudal asignado (l/s/usuario) para cada categoría de sistema de riego.

Los análisis de correlación de Spearman entre la superficie de regadío, el número de usuarios, el coste de los derechos de agua y las tarifas de agua sólo arrojaron asociaciones débiles, lo que indica que no existen relaciones lineales sólidas entre estas variables en este conjunto de datos.

Los medios de subsistencia de los agricultores dependen en diversos grados de las actividades agrícolas y ganaderas (Figura 3). Los sistemas medianos y grandes muestran una dependencia más directa de las actividades productivas, mientras que los sistemas pequeños y micro presentan una mayor variación. De los 235 sistemas de riego analizados,

151 (64%) dependían en más del 70% de las actividades agrícolas para su subsistencia. En concreto, se trata de 43 sistemas medianos con 5167 usuarios, 77 sistemas pequeños con 3785 usuarios, 7 sistemas grandes que engloban a 2593 usuarios y 24 microsistemas que abarcan a 952 usuarios. Este análisis subraya la importancia de la agricultura de regadío en las economías rurales de las regiones montañosas. Sin embargo, aunque estos numerosos sistemas pequeños y micro son evidentemente cruciales para la subsistencia local, su productividad general y su sostenibilidad económica a largo plazo pueden verse limitadas por problemas comunes. Las investigaciones de Berhe et al. (2022) sobre el riego

a pequeña escala en Etiopía revelan que muchos de estos sistemas funcionan por debajo de su potencial de diseño, debido a problemas persistentes de funcionamiento, mantenimiento y capacidad de las instituciones gestoras locales, a menudo agravados por unos recursos financieros limitados.

Esto sugiere que el potencial de los micro y pequeños sistemas de nuestra zona de estudio para mejorar sustancialmente la producción agrícola y garantizar beneficios económicos duraderos para los usuarios podría verse socavado si no se abordan eficazmente estas dificultades operativas y financieras prevalentes, también destacadas por Berhe et al. (2022). Por el contrario, sólo el 10% de los sistemas de riego dependen en un 25% o menos de las acti-

vidades agrícolas y ganaderas para su subsistencia. Esta escasa dependencia puede atribuirse a la presencia de sistemas periurbanos y a la migración de la población a ciudades más grandes, lo que puede provocar el abandono de las tierras y poner en peligro la seguridad alimentaria. Otros factores, como la preferencia de la población más joven por empleos no agrícolas, también pueden contribuir a esta tendencia. Muchos usuarios o agricultores pueden buscar medios alternativos de subsistencia trabajando en zonas urbanas cercanas. Para comprender estos temas y las condiciones reales de los sistemas de riego, se necesita seguir recopilando datos, haciendo hincapié en la información adicional relevante, complementaria y crítica para apoyar la toma de decisiones informadas.

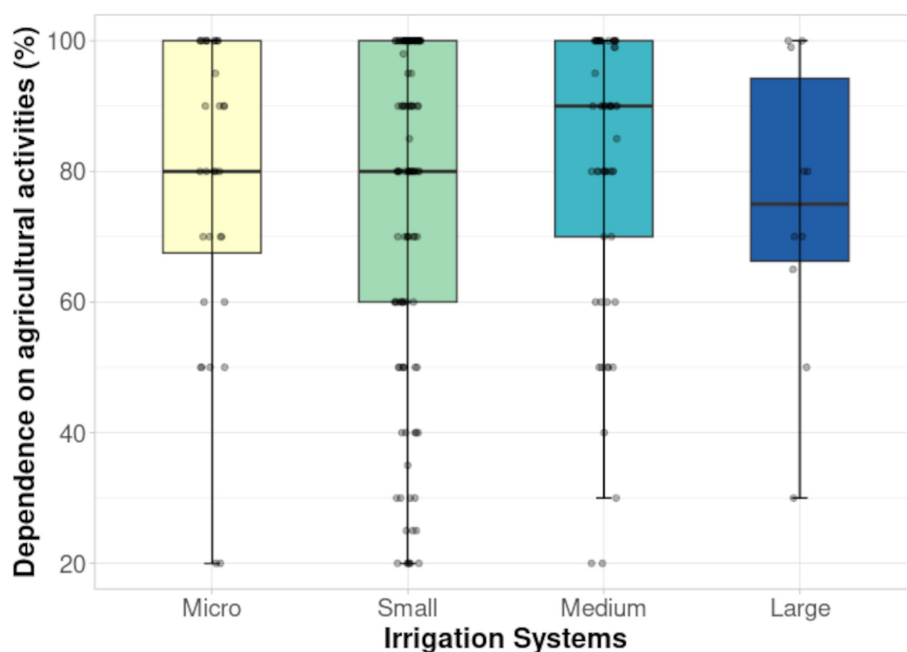


Figura 3. Dependencia de los medios de subsistencia de las actividades agrícolas y ganaderas para cada categoría de sistemas de riego.

3.2 Comparación de factores socioeconómicos, hídricos, de gobernanza y de usuarios entre sistemas de riego

En la Tabla 2 se describen los factores socioeconómicos que influyen en los sistemas de riego. Los cultivos principales en todos los sistemas incluyen pastos, asociaciones de maíz-fréjol y hortalizas. Ex-

cepto en los sistemas medianos, el porcentaje de tierra dedicado a pastos supera al de cultivos, probablemente por el hecho de que la mayor parte del área de producción en Azuay está destinada a pastos naturales y cultivados (GPA, 2018). Las actividades pecuarias, particularmente la producción lechera, tienen una importancia económica significativa en Azuay, representando el 8% de la produc-

ción nacional de leche (GPA, 2018). Sin embargo, los rendimientos de la producción lechera son bajos, lo que indica la necesidad de fortalecer las prácticas de manejo para hacerla más competitiva y equitativa para los productores.

Los agricultores manifestaron que el principal factor que contribuye a las pérdidas de producción es la falta de agua de riego. En los sistemas pequeños, existe preocupación por el mal uso del agua, lo que empeora la situación. Los de sistemas me-

dianos perciben que las sequías afectan aún más a la producción. Las prácticas eficaces de gestión del agua pueden mitigar los riesgos asociados a la escasez de agua y las desigualdades en la distribución, que son fundamentales para mantener los medios de vida agrícolas y las economías rurales. Los responsables de la toma de decisiones deben dar prioridad a las intervenciones que mejoren la infraestructura de riego, promuevan el uso sostenible del agua y apoyen la resiliencia general del sector agrícola.

Tabla 2. Factores socioeconómicos que influyen en la sostenibilidad para cada categoría de sistemas de riego. Se permiten respuestas múltiples; los totales pueden superar el 100%.

Factores socioeconómicos	Microsistemas (<10 ha)	Sistemas pequeños (10-100 ha)	Sistemas medianos (100-500 ha)	Sistemas grandes (>500 ha)
Cultivo principal	Pastos (83%)	Pastos (97%)	Pastos (84%)	Pastos (100%)
Segundo cultivo	Hortalizas (81%)	Asociaciones maíz-fréjol (83%)	Asociaciones maíz-fréjol (84%)	Asociaciones maíz-fréjol (73%)
Producción para autoconsumo	Sí (73%)	Sí (65%)	Sí (60%)	Sí (55%)
Mercado destinatario principal ^{mo}	Cantonal (76%)	Cantonal (69%)	Cantonal (84%)	Cantonal (82%)
Valor añadido en los productos	No (76%)	No (74%)	No (81%)	No (64%)
Retos de comercialización ^{mo}	Precios bajos (73%)	Precios bajos (82%)	Intermediarios (81%)	Precios bajos / Intermediarios (64% cada uno)
Factor de pérdida de producción primaria ^{mo}	Falta de agua (71%)	Falta de agua (58%)	Falta de agua (57%)	Falta de agua (73%)
Afiliados a Organizaciones de Productores	7%	13%	13%	18%
Pérdidas por cosecha y transporte	Sí (10%)	Sí (16%)	Sí (21%)	Sí (9%)

^{mo} = Los encuestados podían seleccionar varias opciones para los factores marcados con (*mo*) en la encuesta original; los porcentajes reflejan la frecuencia de selección de cada opción. “Principal” indica la respuesta más frecuente.

Las actividades productivas son principalmente de subsistencia, incluso entre los sistemas de regadío con mayores superficies irrigadas (es decir, pequeños, medianos y grandes), y la mayor parte de la producción se destina al autoconsumo. Esta situación contribuye a aumentar la migración rural y los retos para la seguridad alimentaria local. Por otra parte, el principal reto al que se enfrentan todos los sistemas de regadío es conseguir un precio

justo para sus productos que garantice la rentabilidad. Un problema clave es la ausencia de políticas e incentivos claros para ayudar a los pequeños agricultores a obtener precios justos por sus productos. Con frecuencia, los intermediarios compran los productos a precios significativamente bajos y se llevan una parte desproporcionada de los beneficios. La falta de comercio justo agrava la situación, obligando a los productores a aceptar precios reducidos

para evitar la pérdida de producto, perpetuando así la posición ventajosa de los intermediarios en la cadena de mercado. Este hallazgo se alinea con la investigación de Rebaï (2017), quien identifica la vulnerabilidad económica de los agricultores familiares en Azuay como derivada principalmente de su falta de acceso al mercado y subordinación a los actores intermediarios, limitando severamente su integración comercial. De hecho, la persistencia de estos desafíos relacionados con el mercado para las pequeñas asociaciones agrícolas, a pesar de las políticas destinadas a apoyarlas, también es destacado por Gómez-Ceballos et al. (2021) en Ecuador, donde se encontraron dificultades significativas en el funcionamiento de los mercados para estas asociaciones que obstaculizan su progreso económico.

Otro problema prevalente es la falta de organización y oportunidades para participar en asociaciones productivas, que tienen el potencial de facilitar el acceso directo al mercado. Esta debilidad observada resuena con el argumento central de Rebaï (2017) de que el fortalecimiento de las organizaciones de agricultores es fundamental para superar las barreras de acceso a los mercados y mejorar los vínculos entre las zonas rurales y urbanas. Según Rebaï (2017), reforzar estas organizaciones es crucial no solo para mejorar la integración económica y el poder de negociación con las autoridades públicas, sino también para fomentar potencialmente la colaboración entre los agricultores, con el fin de mejorar los sistemas productivos y la gestión de los recursos naturales (Ostrom, 1990). En particular, el Gobierno Provincial del Azuay se ha esforzado por establecer mercados directos, con el fin de beneficiar a los productores y garantizar una remuneración equitativa por sus esfuerzos. Este enfoque no sólo mejora la rentabilidad a largo plazo de los agricultores, sino que también garantiza un suministro constante de productos de alta calidad para los consumidores.

La Tabla 3 presenta los factores relacionados con los recursos hídricos. Los usuarios de los sistemas de riego afirman que el estado de las infraestructuras de riego oscila entre bueno y regular. Sin embargo, en los sistemas más grandes, la infraestructura suele calificarse de mala a regular, lo que indica una necesidad de mayores gastos de mantenimiento. Los sistemas más grandes señalan la necesidad de un mantenimiento más frecuente, aproximada-

mente cada mes, en contraste con los sistemas más pequeños, en los que el mantenimiento es más esporádico (de 6 a 12 meses). La necesidad frecuente de mantenimiento (principalmente para la limpieza de sedimentos y la reparación de fugas) subraya los problemas de los grandes sistemas. Estos datos tienen importantes implicaciones para la gestión, ya que sugieren que los grandes sistemas se enfrentan a costes adicionales y que deberían adoptarse medidas específicas para comprender y abordar los problemas concretos de estos sistemas.

Mientras que más del 55% de los agricultores perciben la calidad del agua de sus sistemas de riego como buena, los casos de calidad media suelen estar relacionados a residuos orgánicos procedentes de la agricultura y la ganadería cerca de las fuentes de agua. En cuanto a la percepción que tienen los agricultores de las variaciones del caudal de agua, se señala una disminución significativa de los caudales, sobre todo en los sistemas de riego más grandes. Esta reducción de caudales está vinculada a la expansión de la frontera agrícola y, en algunos casos, a la tala de vegetación nativa y bosques primarios para cultivar pastos para la ganadería. Estos impactos afectan principalmente a la parte baja de la cuenca, siendo los usuarios de esta zona los que experimentan mayores impactos en comparación con los de la cabecera.

En cualquier caso, la degradación de la calidad del agua y la reducción de la descarga podrían afectar negativamente a la seguridad alimentaria y deben ser tomadas en cuenta por los responsables políticos y los gestores del agua. De hecho, la degradación de recursos como el agua y el suelo puede, en última instancia, socavar la viabilidad de los sistemas agrícolas y los medios de subsistencia. Esto se alinea con los hallazgos de López-Carr et al. (2017), quienes identificaron la degradación del suelo como un motor clave de la emigración de las comunidades rurales en Guatemala, lo que sugiere un vínculo crítico entre la salud de los recursos y el potencial de desplazamiento de la población o el abandono del sistema si no se aborda dicha degradación. A pesar de la elevada altitud (más de 3000 m.s.n.m.), aún funcionan pocos sistemas de riego, sobre todo para la micro y pequeña agricultura, donde el riego es inadecuado debido al estado de conservación de estas zonas.

Tabla 3. Evaluación de los factores de los recursos hídricos que influyen en la sostenibilidad de cuatro tipos de sistemas de riego. Se permiten respuestas múltiples; los totales pueden superar el 100 %.

Factores de los recursos hídricos	Microsistemas (<10 ha)	Sistemas pequeños (10-100 ha)	Sistemas medianos (100-500 ha)	Grandes sistemas (>500 ha)
Sistemas de riego >3000 m s.n.m.	29%	26%	16%	9%
Principal método de riego ^{mo}	Riego por aspersión (68%)	Riego por aspersión (74%)	Riego por gravedad (69%)	Riego por aspersión/riego por gravedad (64% cada uno)
Sistemas con reservorio	54%	46%	37%	27%
Estado de la infraestructura	Regular (44%) Buena (34%)	Regular (37%) Buena (31%)	Regular (57%) Bueno (24%)	Malo (55%) Regular (27%)
Frecuencia de mantenimiento principal	6 meses (27%)	6 meses (30%)	6 meses (36%)	6 meses /1 mes (36% cada uno)
Percepción de la calidad del agua	Buena (66%)	Buena (60%)	Buena (68%)	Buena (55%)
Sedimentos en el agua de riego	Sí (56%)	Sí (60%)	Sí (52%)	Sí (82%)
Percepción de la disminución del caudal de agua	Sí (51%)	Sí (65%)	Sí (74%)	Sí (82%)
Causa principal percibida Reducción del caudal	Tala de bosque nativo (71%)	Tala de bosque nativo (79%)	Tala de bosque nativo (82%)	Tala de bosque nativo (46%)
Cambio de turnos de agua durante las estaciones secas	No (61%)	No (82%)	No (76%)	No (82%)
Aumento de las sequías en la última década	51%	63%	76%	82%

^{mo} = Los encuestados podían seleccionar varias opciones para los factores marcados con (*mo*) en la encuesta original; los porcentajes reflejan la frecuencia de selección de cada opción. "Principal" indica la respuesta más frecuente.

Otra preocupación es la continua dependencia de métodos de riego tradicionales (es decir, no presurizados) que contribuyen a importantes pérdidas de agua. Además, la mayoría de los sistemas de riego no disponen de reservorios o embalses para mitigar el impacto de la sequía, lo que los hace vulnerables. Esta susceptibilidad se corrobora por la percepción que tienen los usuarios del aumento de las sequías en los últimos tiempos. A pesar de que son conscientes de la existencia de temporadas más secas, no se han aplicado políticas ni estrategias de adaptación. Esta situación pone de relieve un reto más amplio en la gobernanza del agua. La investigación realizada en Asia Central por Abdullaev et al. (2025), por ejemplo, subraya que para abordar eficazmente la escasez de agua no basta con perseguir la eficiencia, sino que es necesario un

cambio en la gobernanza, y sostienen que una verdadera adaptación requiere dismantelar las importantes barreras existentes y reorientar los enfoques de gobernanza del agua para crear una preparación sólida y a largo plazo para un futuro incierto. Como complemento de esta opinión, Sirimewan et al. (2021b) subrayan, desde una perspectiva sociotécnica, que si bien la adopción de tecnologías mejoradas como el riego por aspersión o por goteo es vital para el uso sostenible del agua, estas soluciones técnicas no pueden tener éxito de forma aislada. Su investigación en Sri Lanka pone de manifiesto que el éxito de la adopción de estas prácticas eficientes también depende en gran medida de la existencia de entornos sociales, de gestión y normativos favorables.

En la Tabla 4 se examinan los problemas de go-

bernanza de los sistemas de riego. La ausencia de una normativa clara es evidente en los sistemas de riego, sobre todo en lo que se refiere a las tasas por el uso del agua, la distribución del agua y la adquisición de derechos sobre el agua. Resulta sorprendente comprobar que un número significativo de AUA carece de reconocimiento legal (29- 44%). Esta falta de estatus formal presenta varios inconvenientes. Sin reconocimiento legal, las AUA se enfrentan a di-

ficultades a la hora de gestionar sus sistemas con eficacia, conseguir fondos para mejorarlos y colaborar con ONG y otras organizaciones externas. El reconocimiento legal es crucial para que las AUA operen con plena autoridad, accedan a recursos financieros y colaboren con las partes interesadas para mejorar la sostenibilidad y eficiencia de sus sistemas de riego.

Tabla 4. Evaluación de los factores de gobernanza que influyen en la sostenibilidad en cuatro tipos de sistemas de riego. Se permiten respuestas múltiples; los totales pueden superar el 100 %.

Factores de gobernanza	Microsistemas (<10 ha)	Sistemas pequeños (10-100 ha)	Sistemas medianos (100-500 ha)	Sistemas grandes (>500 ha)
AUA que pagan tasas por el uso del agua	59 %	65 %	58 %	73 %
Regla principal de distribución de agua	Distribución de agua independiente de la superficie (49 %)	Distribución de agua independiente de la superficie (46 %)	Proporcional a la superficie (42 %)	Proporcional a la superficie (46 %)
Las AUA recibieron financiación externa para la captación de agua.	No (61 %)	No (74 %)	No (82 %)	No (64 %)
Las AUA tienen reconocimiento legal	56 %	60 %	71 %	64 %
Principal organización que ayuda a la construcción	Gobierno regional (49 %)	Gobierno regional (63 %)	Gobierno regional (63 %)	Gobierno regional (64 %)
Principal definición de los derechos de agua	Ganados (participación en la construcción) (54 %)	Comprados (59 %)	Comprados (60 %)	Comprados (55 %)
Tipo principal de derechos de agua	Vinculados a la parcela (49 %)	Vinculados a la parcela (55 %)	Vinculados a la parcela (73 %)	Vinculado a la parcela (73 %)
Disposición de la AUA para comprometerse externamente	Alta (66 %)	Alta (69 %)	Alta (69 %)	Alta (82 %)
Existen directrices internas de funcionamiento	Sí (61 %)	Sí (72 %)	Sí (68 %)	Sí (82 %)
Cumplimiento de las normas internas	Parcialmente (37 %)	Sí (38 %)	Sí (47 %)	Sí (73 %)
Principal práctica social prohibida ^{mo}	Compartir el agua (88 %)	Turnos de intercambio (98 %)	Turnos de intercambio (82 %)	Turnos de intercambio (100 %)

^{mo} = Los encuestados podían seleccionar varias opciones para los factores marcados con (*mo*) en la encuesta original; los porcentajes reflejan la frecuencia de selección de cada opción. "Principal" indica la respuesta más frecuente.

Otro hallazgo inesperado es que, en un gran número de sistemas de riego, los agricultores no pagan tarifas por el agua. Según la legislación ecuatoriana especificada en el artículo 116 del Reglamento Ley Recursos Hídricos y Aprovechamiento del Agua (Correa, 2015), todos los usuarios del agua están obligados a pagar tasas por el uso del agua. Este hallazgo pone de relieve la débil aplicación de la normativa. Aunque más del 40% de los sistemas no imponen tarifas en absoluto, cabe destacar que los grandes sistemas cumplen esta normativa. La aplicación de estos cánones pretende fomentar la independencia de las AUA en la gestión de los sistemas de riego y reducir su dependencia de instituciones externas para la inversión y el mantenimiento de las infraestructuras. Esta independencia pretende, en última instancia, mejorar la eficacia de la distribución del agua.

Se necesita un cambio hacia una gobernanza participativa, que incorpore principios de fijación de precios justos diseñados para cubrir costes integrales como la planificación, la adaptación al clima y el mantenimiento (WWAP, 2019). Sin embargo, una parte integral del éxito de dicha gobernanza es la prevención activa de las ineficiencias de gestión, que se identifican como factores clave que pueden aumentar la vulnerabilidad del sistema y obstaculizar la gestión adecuada del agua (Pacheco-Peña et al., 2023).

Además, más del 70% de los sistemas de riego funcionan de forma independiente, sin acuerdos de colaboración con instituciones externas. Esta independencia, combinada con el incumplimiento de las tarifas de uso del agua, a menudo dificulta una gestión eficaz del riego. Aunque una mayoría significativa de las AUA expresa su voluntad de colaborar con instituciones externas, hay casos notables en los que las AUA dudan en participar en los esfuerzos de colaboración. La reticencia observada en algunas AUA es un factor crítico a tener en cuenta por los responsables de la toma de decisiones. Para evitarlo, los responsables de la toma de decisiones deberían centrarse en dos acciones clave: 1) apoyar activa y rápidamente a las AUA que estén dispuestas a colaborar, incluyendo el fomento de oportunidades para las ONG, y 2) iniciar un proceso de diálogo diseñado para comprender y abordar las reservas de aquellas AUA que se muestren reticentes. Al abordar estos retos de gobernanza, los

responsables de la toma de decisiones eligen esencialmente entre un espectro de acciones, como sugiere la FAO (2024). Las opciones van desde trabajar dentro de las estructuras de poder existentes hasta implementar cambios más transformadores que alteren la influencia de los diferentes actores (por ejemplo, fortalecer las AUA). Esta elección entre el ajuste incremental y la reforma estructural es fundamental, ya que afecta a la viabilidad y al impacto final de las mejoras en la gobernanza.

Encontramos que los agricultores pueden adquirir derechos de uso del agua por diversos medios. Además de los pagos, los derechos de agua pueden obtenerse contribuyendo con mano de obra a la construcción de sistemas de riego o por herencia. En los sistemas más grandes, la participación en la legalización de los sistemas de riego sirve como vía alternativa para obtener derechos de agua. Además, la vinculación de los derechos de agua a la tierra o a los individuos conduce a pagos no equitativos, ya que los derechos de los individuos pueden utilizarse en múltiples parcelas. Por otra parte, el agua asignada a las parcelas de los usuarios no tiene en cuenta la superficie de la parcela, lo que puede dar lugar a una cantidad insuficiente o excesiva de agua para las actividades agrícolas y ganaderas. Abordar estas complejidades de manera eficaz probablemente requiera un análisis multicriterio dentro de un marco de cogestión, involucrando a todos los actores para desarrollar sistemas de asignación y derechos que promuevan tanto la sostenibilidad como la eficiencia (Rivera, 2016), reconociendo el papel del agua en la soberanía alimentaria y las economías locales (Pacheco-Peña et al., 2023).

A pesar de la presencia de reglamentos internos y lineamientos internos de operación del sistema de riego, especialmente en los micro y pequeños sistemas, su cumplimiento es a menudo inexistente, lo que indica una deficiencia en la gobernanza necesaria para una gestión eficaz y sostenible. Esta falta de funcionamiento adecuado conduce a la desorganización, especialmente en la distribución del agua durante los turnos de riego.

Aunque los usuarios de los sistemas de riego no intercambian turnos de agua por productos, trabajo o préstamos, la falta de una normativa clara permite a un porcentaje significativo de usuarios acceder al agua de otros. El reparto del agua lo deciden a

menudo los usuarios, sobre todo en los sistemas más grandes. Se trata de un aspecto importante de la gobernanza y la gestión técnica. Se necesitan más estudios para analizar cómo pueden mejorarse estas prácticas para mejorar la gestión del riego.

En la Tabla 5 se enumeran los distintos parámetros relacionados con los usuarios. Los usuarios de todos los sistemas de riego reconocen que el principal problema son las infraestructuras, pues se acentúan a medida que crece el sistema de riego debido a la acumulación de sedimentos y a la gran necesidad de mantenimiento constante. Un tema importante es la ausencia generalizada de operadores formados para los sistemas de riego. Cuando se designa a alguien para esta función, a menudo carece de la formación adecuada y confía en cambio en una experiencia limitada. Aunque algunos usuarios han recibido formación en áreas como la gestión técnica; aspectos socio-organizativos; y administración, operación y mantenimiento, muy pocos usuarios de micro, pequeños y medianos sistemas han accedido a esta formación. En cambio, los sistemas más grandes parecen tener mejores estructuras organizativas; sin embargo, casi la mitad de ellos no cuentan con un operador de riego, y de los que sí lo tienen, más de la mitad no están bien capacitados para desempeñar la tarea.

Los horarios de riego suelen ser tanto diurnos como nocturnos. Esto puede plantear problemas importantes en cuanto al uso correcto del agua, sobre todo cuando el riego se produce por la noche. Las pérdidas de agua son mayores en los sistemas en los que el riego no está presurizado y carecen de tecnología de control automático. Además, pueden desencadenar movimientos en masa y deslizamientos de tierra. Es crucial abordar estos problemas implantando tecnologías de riego avanzadas que permitan un control preciso del agua. Además, establecer directrices claras e impartir formación sobre prácticas de riego óptimas puede ayudar a mitigar el despilfarro de agua y prevenir los deslizamientos de tierra. Los responsables de la toma de decisiones deberían dar prioridad a la adopción de sistemas de riego automatizados y apoyar iniciativas que mejoren los conocimientos técnicos de los agricultores y los operadores de los sistemas de riego.

Sin embargo, un punto fuerte clave en todos los sistemas de riego es el capital social que facilita el trabajo colectivo a través de las mingas por el bien

común. De hecho, las mingas son el método principal para el mantenimiento del sistema y otras actividades. Esta dependencia de la acción colectiva, arraigada en las normas locales de reciprocidad y confianza, es crucial para la gestión y adaptación de los sistemas de riego andinos, un hallazgo respaldado por la investigación tanto en los Andes venezolanos (Leroy et al., 2022) como en el altiplano ecuatoriano (Hoogesteger, 2015).

3.3 Limitaciones del estudio

Este estudio se basa en los datos de una encuesta realizada en el 2022 por el Gobierno Provincial del Azuay. Si bien esta fuente de datos ofrece valiosas perspectivas regionales sobre los sistemas de riego, conlleva a limitaciones inherentes que deben señalarse.

La principal limitación se deriva del método de recopilación de datos. La información se recopiló de los representantes de las AUA. Aunque estas personas suelen estar bien informadas sobre sus respectivos sistemas, es posible que sus puntos de vista no abarquen plenamente las diversas experiencias y opiniones de todos los usuarios individuales del agua. Además, las respuestas podrían estar influenciadas por sus funciones de liderazgo, lo que podría introducir cierto grado de subjetividad. En consecuencia, los datos relativos a temas cuantitativos específicos o potencialmente sensibles, como la productividad o los ingresos de las parcelas individuales, podrían reflejar estimaciones en lugar de cifras precisas, ya que es posible que los representantes no posean o compartan información completa de todos los miembros.

Además, la selección de representantes de las AUA como encuestados podría introducir un sesgo de género significativo. Si estos representantes fueran predominantemente hombres -una situación común en este tipo de organizaciones-, la encuesta no captaría las perspectivas de las mujeres sobre aspectos cruciales como la participación en la toma de decisiones o sus opiniones sobre la eficacia y la equidad de la gestión del sistema de riego. En consecuencia, es posible que los resultados no representen plenamente las experiencias y puntos de vista de toda la comunidad de usuarios, en particular en lo que respecta a los retos o prioridades específicos de cada sexo.

Tabla 5. Evaluación de los factores de los “Usuarios” que influyen en la sostenibilidad en cuatro tipos de Sistemas de Riego. Se permiten múltiples respuestas; los totales pueden superar el 100 %.

Factores usuarios	Microsistemas (<10 ha)	Sistemas pequeños (10-100 ha)	Sistemas medianos (100-500 ha)	Sistemas grandes (>500 ha)
Principal preocupación del sistema	Infraestructuras (42 %)	Infraestructuras (63 %)	Infraestructuras (58 %)	Infraestructuras (91 %)
Solución principal considerada	Mejora de las infraestructuras (59 %)	Mejora de las infraestructuras (68 %)	Mejora de las infraestructuras (66 %)	Mejora de las infraestructuras (82 %)
Principal problema actual de funcionamiento y mantenimiento ^{mo}	Daños en la acequia principal (59 %)	Daños en la acequia principal (80 %)	Daños en la acequia principal (84 %)	Daños en la acequia principal (91 %)
Horario de riego (variable día/noche)	(63 %)	(72 %)	(87 %)	(100 %)
El sistema tiene operador	No (78 %)	No (82 %)	No (65 %)	No (55 %)
Operador considerado como calificado	Sí (50 %)	Sí (73 %)	Sí (80 %)	Sí (60 %)
Operario formado	No (100 %)	No (64 %)	No (65 %)	No (40 %)
Otros usuarios recibieron formación para operar	No (68 %)	No (80 %)	No (71 %)	No (64 %)
Principal tema de formación de usuarios recibido	Administración, funcionamiento y mantenimiento (17 %)	Administración, explotación y mantenimiento (15 %)	Administración, explotación y mantenimiento (8 %)	Gestión técnica del sistema (36 %)
Principal método de mantenimiento	Esfuerzo colectivo de los usuarios (“minga”) (90 %)	Esfuerzo colectivo de los usuarios (“minga”) (94 %)	Esfuerzo colectivo de los usuarios (“minga”) (89 %)	Esfuerzos colectivos de los usuarios (“minga”) (100 %)

^{mo} = Los encuestados podían seleccionar varias opciones para los factores marcados con (*mo*) en la encuesta original; los porcentajes reflejan la frecuencia de selección de cada opción. “Principal” indica la respuesta más frecuente.
Minga: Palabra de origen quechua que hace referencia a un esfuerzo colectivo por el bien común.

A pesar de estas limitaciones, los datos de la encuesta proporcionan una valiosa evaluación del estado de la gobernanza y la infraestructura de riego en Azuay. Los resultados identifican con éxito los retos clave y las áreas prioritarias, ofreciendo una orientación esencial para la investigación específica y el desarrollo de políticas en el futuro. Este estudio también pone de manifiesto la necesidad de una recopilación de datos posterior y más sistemática, que potencialmente incorpore un muestreo estratificado a nivel de usuario individual y métodos diseñados para captar diversas perspectivas, con el fin de apoyar una gestión sólida y equitativa de los recursos hídricos a largo plazo.

4 Conclusiones

Tras un análisis exhaustivo de los factores comparativos entre los sistemas de regadío, se identificaron varios puntos críticos relativos a su gestión y sostenibilidad, que requieren un seguimiento y una mayor investigación. La gobernanza eficaz ha surgido como la principal preocupación, ya que influye en la administración del sistema, la obtención de fondos, la recaudación de tasas y la estabilidad a largo plazo. Sin estructuras de gobernanza sólidas, estos sistemas tienen dificultades para funcionar eficazmente. La distribución equitativa del agua es otro tema importante; las autoridades deben actualizar y regular el suministro de agua para garantizar que los sistemas reciban la cantidad técnicamente necesaria de las fuentes disponibles, adoptando un en-

foque técnico-ambiental de la asignación del agua.

La falta de gobernanza dificulta aún más la sostenibilidad del sistema. Los sistemas sin gobernanza no pueden recaudar los fondos necesarios para su funcionamiento y mantenimiento, ni establecer un equipo técnico para la gestión diaria y las funciones de asesoramiento, ni crear normas de funcionamiento ni conseguir un estatuto jurídico. El papel del gobierno regional y del Ministerio de Agricultura es crucial para apoyar estos sistemas proporcionando formación continua a los operadores, apoyo legal constitucional y acceso a los mercados.

Además, en un número significativo de sistemas, la producción agrícola ya no es la principal fuente de ingresos, lo que pone en peligro la seguridad alimentaria. Por lo tanto, el abordaje de problema requiere una intervención específica por parte de las instituciones públicas. La vulnerabilidad del sistema también es evidente: si falla la recaudación de tasas, el sistema deja de funcionar; si el operador no está disponible, no hay sustituto; sin normas de funcionamiento, los procedimientos no están claros; y en las sequías, la escasez de agua se vuelve crítica.

Es necesario un seguimiento sistemático, ya que las condiciones pueden cambiar. La supervisión anual ayudará a observar la evolución del sistema, analizar el impacto de las políticas e intervenciones y evaluar los efectos del clima y las condiciones socioeconómicas, como la migración. Es esencial desarrollar indicadores de rendimiento adaptados a las realidades locales. Al abordar estas áreas clave, los responsables de la toma de decisiones pueden emprender acciones específicas para mejorar la gestión y la sostenibilidad de los sistemas de riego, apoyando en última instancia la resiliencia y la productividad del sector agrícola.

Agradecimientos

Este estudio forma parte del proyecto SDGnexus Network (número de subvención 57526248), financiado por el Servicio Alemán de Intercambio Académico (DAAD) con el apoyo del Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo (BMZ) en el marco del programa "exceed - Excelencia en la Cooperación al Desarrollo". La Universidad de Cuenca cofinanció esta investigación a través del Vi-

correctorado de Investigación. Agradecemos al Gobierno Provincial del Azuay por la base de datos de sistemas de riego. Agradecemos los comentarios constructivos de dos revisores anónimos, que ayudaron a mejorar el manuscrito.

Contribuciones de los autores

G.B.: Conceptualización, metodología, análisis formal, curación de datos, redacción del borrador original. R.C.: Conceptualización, metodología, obtención de fondos, redacción-revisión y edición.

Referencias

- Abdullaev, I., Assubayeva, A., Bobojonov, I., Djanibekov, N., Dombrowsky, I., Gafurov, A., Hamidov, A., Herrfahrtd-Pähle, E., Janusz-Pawletta, B., Ishangulyyev, R., Kasymov, U., Mirkasimov, B., Petrick, M., Strobehn, K., and Ziganshina, D. (2025). Current challenges in central asian water governance and their implications for research, higher education, and science-policy interaction. *Central Asian Journal of Water Research*, 11(1):47–58. Online: <https://bit.ly/4obHzYv>.
- Alexandratos, N. and Bruinsma, J. (2012). World agriculture towards 2030/2050: The 2012 revision. resreport 12-03, ESA Working paper No. 12-03. Rome, FAO., Roma.
- Berhe, G., Baartman, J., Veldwisch, G., Grum, B., and Ritsema, C. (2022). Irrigation development and management practices in ethiopia: A systematic review on existing problems, sustainability issues and future directions. *Agricultural Water Management*, 274:107959. Online: <https://bit.ly/3IRYclz>.
- Bjornlund, H., van Rooyen, A., Pittock, J., and Bjornlund, V. (2023). Research and development needs in agricultural water management to achieve sustainable development goals. *Irrigation and Drainage*, 72(5):1260–1268. Online: <https://bit.ly/3ISz7Nw>.
- Campozano, L., Célleri, R., Trachte, K., Bendix, J., and Samaniego, E. (2016). Rainfall and cloud dynamics in the andes: A southern ecuador case study. *Advances in Meteorology*, 72(5):1–15. Online: <https://bit.ly/4fa7J9P>.

- Celleri, R., Willems, P., Buytaert, W., and Feyen, J. (2007). Space-time rainfall variability in the paute basin, ecuadorian andes. *Hydrological Processes*, 21(24):3316–3327. Online: <https://bit.ly/3U02fVB>.
- Communal, T., Faysse, N., Bleuze, S., and Aceldo, B. (2016). Effects at farm and community level of the adoption of sprinkler irrigation in the ecuadorian andes. *Irrigation and Drainage*, 65(4):559–567. Online: <https://bit.ly/3Uo6jzf>.
- Correa, R. (2015). Decreto 650: Reglamento ley recursos hídricos y aprovechamiento del agua. Decreto, Gobierno de Ecuador, Quito.
- ESPAC (2023). Módulo de información ambiental y tecnificación agropecuaria. Webpage.
- FAO (2016). Water for sustainable food and agriculture. Webpage.
- FAO (2020). The state of food and agriculture 2020. overcoming water challenges in agriculture. Webpage.
- FAO (2024). Water auditing/water governance analysis—governance and policy support: Methodological framework. Webpage.
- Gómez-Ceballos, G., Vázquez-Loaiza, J., Herrera-Torres, D., and Vega-Luna, A. (2021). Popular and solidarity economy: Policies and realities in the local context—the case of the agricultural productive associations of el valle, ecuador. *Sustainability*, 13(23):13469. Online: <https://bit.ly/4l3R2hE>.
- GPA (2018). Actualización del plan de desarrollo y ordenamiento territorial del azuay. techreport, Gobierno Provincial del Azuay, Cuenca.
- GPA (2019). Revista agroazuay. techreport, Gobierno Provincial del Azuay, Cuenca.
- Gutierrez, J., Villa-Medina, J., Nieto-Garibay, A., and Porta-Gandara, M. (2014). Automated irrigation system using a wireless sensor network and gprs module. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 63(1):166–176. Online: <https://bit.ly/455mRkd>.
- Hoogesteger, J. (2013). Trans-forming social capital around water: Water user organizations, water rights, and nongovernmental organizations in cangahua, the ecuadorian andes. *Society & Natural Resources*, 26(1):60–74. Online: <https://bit.ly/4f8Ebta>.
- Hoogesteger, J. (2015). Normative structures, collaboration and conflict in irrigation; a case study of the pillaro north canal irrigation system, ecuadorian highlands. *International Journal of the Commons*, 9(1):398–415. Online: <https://bit.ly/4lU7dQ1>.
- Leroy, D. (2019). Farmers' perceptions of and adaptations to water scarcity in colombian and venezuelan páramos in the context of climate change. *Mountain Research and Development*, 39(2):R21–R34. Online: <https://bit.ly/3H9txpt>.
- Leroy, D., García, S. B., and Porto Tapiquén, E. (2022). Understanding institutional changes in irrigation management: a comparative case study of two communities in the venezuelan andes. *Water International*, 47(8):1287–1309. Online: <https://bit.ly/4mfWVJw>.
- Li, M., Xu, Y., Fu, Q., Singh, V. P., Liu, D., and Li, T. (2020). Efficient irrigation water allocation and its impact on agricultural sustainability and water scarcity under uncertainty. *Journal of Hydrology*, 586(1-2):124888. Online: <https://bit.ly/3IS6xMn>.
- López-Carr, D., Martinez, A., Bilsborrow, R. E., and Whitmore, T. M. (2017). Geographical and individual determinants of rural out-migration to a tropical forest protected area: The maya biosphere reserve, guatemala. *Cybergeo: European Journal of Geography*, 8(2):78–106. Online: <https://bit.ly/45sncyI>.
- Ostrom, E. (1990). *Governing the Commons: The Evolution of Institutions for Collective Action*. Cambridge University Press.
- Pacheco-Peña, D., Lema-Quinga, L., and Yáñez-Moretta, P. (2023). Cogestión del agua entre actores públicos y comunitarios como herramienta de adaptación al cambio climático global: el caso de la comuna santa clara de san millán, dm quito. *LA GRANJA. Revista de Ciencias de la Vida*, 37(1):44–57. Online: <https://bit.ly/3H8RWvq>.
- Parry, K., van Rooyen, A. F., Bjornlund, H., Kissoly, L., Moyo, M., and de Sousa, W. (2020). The importance of learning processes in transitioning small-scale irrigation schemes. *International Journal of*

- Water Resources Development*, 36(sup1):S199–S223. Online: <https://bit.ly/3U3LcSt>.
- Rebaï, N. (2017). Vulnerabilidad de la agricultura familiar y de los territorios rurales en los andes ecuatorianos. un análisis desde la provincia del azuay. *Ecuador Debate*, 100:167–177. Online: <https://bit.ly/4odD0wC>.
- Rivera, S. (2016). La sostenibilidad del recurso hídrico en el ecuador: análisis multicriterial de la gestión del agua. mathesis, Tesis de Maestría en Economía Ecológica. Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales.
- Sauer, T., Havlík, P., Schneider, U., Schmid, E., Kindermann, G., and Obersteiner, M. (2010). Agriculture and resource availability in a changing world: The role of irrigation. *Water Resources Research*, 46(W06503):Online: <https://bit.ly/4785P7J>.
- Sirimewan, D., Mendis, A., Rajini, D., Samaraweera, A., and Manjula, N. (2021a). Analysis of issues in sustainable water management of irrigation systems: case of a developing country. *Built Environment Project and Asset Management*, 11(4):529–543. Online: <https://bit.ly/44UIPc7>.
- Sirimewan, D., Samaraweera, A., Manjula, N., Rameezdeen, R., Rodrigo, M., and Ekanayake, E. (2021b). Strategies for sustainable irrigation system management: a socio-technical system approach. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 30(2):436–455. Online: <https://bit.ly/45fACgx>.
- Tenesaca, C., Quindi, T., Delgado, G., Toledo, E., and Delgado, O. (2017). Generación del mapa de cobertura y uso del suelo de la provincia del azuay. *Universidad Verdad*, 1(73):23–37. Online: <https://bit.ly/4mhthUi>.
- United Nations (2021). Summary progress update 2021: Sdg 6- water and sanitation for all. Webpage.
- United Nations (2023). The united nations world water development report 2023: Partnerships and cooperation for water. Webpage.
- van Rooyen, A. F., Ramshaw, P., Moyo, M., Stirzaker, R., and Bjornlund, H. (2017). Theory and application of agricultural innovation platforms for improved irrigation scheme management in southern africa. *International Journal of Water Resources Development*, 33(5):804–823. Online: <https://bit.ly/45aOCb0>.
- Wada, Y., Flörke, M., Hanasaki, N., Eisner, S., Fischer, G., Tramberend, S., Satoh, Y., van Vliet, M., Yillia, P., Ringler, C., Burek, P., and Wiberg, D. (2016). Modeling global water use for the 21st century: the water futures and solutions (wfas) initiative and its approaches. *Geoscientific Model Development*, 9(1):175–222. Online: <https://bit.ly/41cojAa>.
- Wisser, D., Frohking, S., Douglas, E., Fekete, B., Vörösmarty, C., and Schumann, A. (2008). Global irrigation water demand: Variability and uncertainties arising from agricultural and climate data sets. *Geophysical Research Letters*, 35(24):1–5. Online: <https://bit.ly/4fdsb9N>.
- WWAP (2019). Informe mundial de las naciones unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2019: No dejar a nadie atrás. techreport, Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de la UNESCO.



GESTIÓN COMUNITARIA Y SOSTENIBILIDAD EN SISTEMAS DE RIEGO ANDINOS MEDIANTE INDICADORES DE USO EFICIENTE DEL AGUA EN LA AGRICULTURA

COMMUNITY MANAGEMENT AND SUSTAINABILITY IN ANDEAN IRRIGATION
SYSTEMS THROUGH INDICATORS OF EFFICIENT WATER USE IN AGRICULTURE

Charles Cachipueno*¹, Mercy Ilbay² y Narcisa Requelme³

¹Universidad Politécnica Salesiana, Grupo de Investigación de Ciencias Ambientales, Campus el Girón, Av. 12 de Octubre 24-22. Quito, Ecuador. [<https://ror.org/00f11af73>]

²Grupo de Gestión de Recursos Hídricos, Universidad Técnica de Cotopaxi, Av. Simón Rodríguez s/n Barrio El Ejido Sector San Felipe, 050104, Latacunga, Ecuador. [<https://ror.org/004jbx603>]

³Universidad Politécnica Salesiana, Grupo de Investigación de la Leche, Campus el Girón, Av. 12 de Octubre 24-22. Quito, Ecuador. [<https://ror.org/00f11af73>]

*Autor para correspondencia: ccachipueno@ups.edu.ec

Manuscrito recibido el 22 de enero de 2025. Aceptado, tras revisión el 7 de julio de 2025. Publicado el 1 de septiembre de 2025.

Resumen

A nivel global, la creciente competencia por el agua y los efectos del cambio climático han acentuado la necesidad de evaluar la sostenibilidad de los sistemas de riego, especialmente en ecosistemas estratégicos como los páramos andinos. Sin embargo, existe un vacío en herramientas metodológicas que integren indicadores adaptados a contextos comunitarios y alineados con marcos globales como los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y los Principios de Inversión Responsable en Agricultura (CSA-IRA). Esta investigación tiene como objetivo definir los indicadores para evaluar la sostenibilidad de sistemas de riego comunitarios en Ecuador. Se consideró la metodología MESMIS y la técnica Delphi mediante un enfoque participativo que incluyó líderes comunitarios, técnicos, académicos y estudiantes. Se definieron 31 indicadores, organizados en siete atributos y cinco dimensiones (ambiental, social, económica, política y tecnológica), articulados con nueve ODS y siete Principios CSA-IRA. Los resultados evidencian puntos críticos en la eficiencia hídrica, gobernanza, equidad y resiliencia de los sistemas. La propuesta permite una evaluación integral y contextualizada de los sistemas de riego, y ofrece una herramienta práctica para el diseño de políticas públicas. En conclusión, se contribuye a cerrar el vacío metodológico existente y se fortalece el rol de los sistemas de riego comunitarios como pilares para una agricultura sostenible y resiliente.

Palabras clave: MESMIS, páramos, riego sustentable, gestión comunitaria del agua, Indicadores de sostenibilidad.

Abstract

Globally, increasing competition for water and the effects of climate change have heightened the need to assess the sustainability of irrigation systems, particularly in strategic ecosystems such as the Andean páramos. However, there is a gap in methodological tools that integrate indicators adapted to community-based contexts and aligned with global frameworks such as the Sustainable Development Goals (SDGs) and the Principles for Responsible Investment in Agriculture and Food Systems (RAI Principles). This study aims to define indicators for evaluating the sustainability of community-managed irrigation systems in Ecuador. The MESMIS framework and the Delphi technique were applied using a participatory approach that involved community leaders, technicians, academics, and students. A total of 31 indicators were defined, organized into seven attributes and five dimensions (environmental, social, economic, political, and technological), and aligned with nine SDGs and seven RAI Principles. The results reveal critical issues related to water use efficiency, governance, equity, and system resilience. The proposed framework enables a comprehensive and context-specific evaluation of irrigation systems and provides a practical tool for public policy design. In conclusion, this research helps bridge the existing methodological gap and reinforces the role of community irrigation systems as key pillars for sustainable and resilient agriculture.

Keywords: MESMIS, páramos, sustainable irrigation, community water management, sustainability indicators.

Forma sugerida de citar: Cachipundo, C., Ilbay, M. y Requelme, N. (2025). Gestión comunitaria y sostenibilidad en sistemas de riego andinos mediante indicadores de uso eficiente del agua en la agricultura. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*. Vol. 42(2):41-60. <https://doi.org/10.17163/lgr.n42.2025.03>.

IDs Orcid:

Charles Cachipundo: <https://orcid.org/0000-0002-7700-7740>

Mercy Ilbay: <https://orcid.org/0000-0001-9503-2686>

Narcisa Requelme: <https://orcid.org/0000-0002-3877-199X>

1 Introducción

El paradigma de la sostenibilidad ha ampliado el marco de análisis de los sistemas naturales, integrando dimensiones económicas, ambientales y sociales aplicables a la producción agropecuaria (González et al., 2006; Guo and Yu, 2022). Sin embargo, Talukder et al. (2020) cuestionan si los sistemas agrícolas sostenibles pueden garantizar la seguridad alimentaria, particularmente en países de baja renta. Estos autores argumentan que alcanzar este objetivo requiere una “intensificación sostenible” del uso de recursos como el agua, mediante tecnologías avanzadas que minimicen o eliminen los impactos ambientales adversos como la captura de agua lluvia (Cachipundo et al., 2024). En este contexto, debe evaluarse el riego, pues está considerado como un sistema clave en la agricultura, desde la perspectiva de su sostenibilidad.

El riego desempeña un papel fundamental en la seguridad hídrica y alimentaria (Darzi-Naftchali et al., 2020) y si debe analizar su sostenibilidad bajo el impacto del cambio climático, considerando factores como la conservación de recursos naturales, la innovación tecnológica y la eficiencia en el uso del agua en la agricultura (Velasco-Muñoz et al., 2018; Darzi-Naftchali et al., 2020). Comúnmente, se considera al riego como un medio de producción que mejora la gestión del agua en la agricultura (Wang and Wu, 2018) y como un sistema socio-ecológico-técnico que integra aspectos físicos, organizativos, sociales y naturales (Newman et al., 2011). No obstante, su gestión enfrenta desafíos técnicos y financieros, especialmente en contextos donde la administración del riego se ha transferido de organismos gubernamentales a asociaciones de agricultores u otras entidades privadas (Nagrah et al., 2016; Shalsi et al., 2022). Este cambio ha generado desempeños desiguales y resultados limitados en la práctica (Araral, 2005).

Para las comunidades rurales, el riego no es solo un medio de producción agrícola (Brugnach et al., 2017), sino un sistema complejo en el que convergen la naturaleza, comunidad e infraestructura (Cachipundo Ulcuango et al., 2021). Su operación genera interrelaciones sociales, ambientales y económicas (Fernald et al., 2012), y estructuradas bajo organizaciones que gestionan y operan el riego según lineamientos legales de cada país (Herrán et al., 2017).

Ante la crisis climática y el crecimiento poblacional, surge la necesidad de incrementar la producción de alimentos en alineación con los Objetivos de Desarrollo sostenible (ODS) y los Principios de Inversión Responsable en Agricultura (CSA-IRA) (Jägermeyr et al., 2017).

Considerando las dinámicas socioculturales, ambientales, políticas y tecnológicas de los sistemas de riego, resulta necesario identificar los mecanismos integradores que permitan analizar los puntos críticos en sus componentes para establecer estrategias sostenibles y eficientes en el uso del agua.

En los Andes, el agua para la agricultura proviene principalmente de fuentes superficiales y subterráneas alimentadas por glaciares, los cuales han disminuido un 25 % en los últimos 30 años debido al cambio climático (Gallegos et al., 2018) y de los humedales que se forman en el ecosistema del pajonal que captan el agua de la lluvia y nubosidades que posteriormente se infiltran. Sin embargo, los ecosistemas de páramo y bosques altoandinos están perdiendo su capacidad de retención de agua por causas antropogénicas y climáticas (Llambí et al., 2012). Ante esta realidad, las organizaciones de riego han implementado estrategias como el riego presurizado, lo que ha mejorado la resiliencia de agricultores y las comunidades (Cachipundo, 2022). Por lo tanto, la sostenibilidad de estos sistemas requiere una evaluación integral que considere las dimensiones sociales, ambientales, económicas, políticas y tecnológicas (Chile and Ortiz, 2021).

El estudio de los sistemas de riego se ha centrado en indicadores específicos como la eficiencia física del agua a nivel de la parcela, el rendimiento económico y los impactos ambientales (Cachipundo Ulcuango, 2021). Este enfoque fragmentado no aborda de forma integral la sostenibilidad del sistema ni la interrelación de sus dimensiones. Las metodologías como el MESMIS ofrecen herramientas basadas en pensamiento sistémico para evaluar la sostenibilidad de manera dinámica, versátil y adaptada a las realidades locales (Masera et al., 2000).

La evaluación de la sostenibilidad de un sistema natural implica identificar sus elementos físicos, sociales, ambientales, políticos y económicos, y analizar sus interacciones mediante los modelos sistémicos (Samian et al., 2015; Carmona et al., 2013). En

los Andes, la evaluación de los sistemas de riego se estructura en tres subsistemas: naturaleza, comunidad y uso del suelo (Cachipiendo Ulcuango, 2021). Cada subsistema requiere indicadores específicos como la disponibilidad y calidad del agua (Costa et al., 2022), la capacidad organizativa de las comunidades (Turner et al., 2016), la eficiencia económica del agua (Meng et al., 2022) y la tecnificación del riego (Laali et al., 2022). El uso de las metodologías como el Marco para la Evaluación de Sistemas de Manejo Incorporando Indicadores de Sustentabilidad (MESMIS), permiten integrar indicadores y evaluar simultáneamente las dimensiones de sostenibilidad, incluyendo la participación de las partes interesadas (Sarandón, 2010; Franco et al., 2012). Este enfoque ha demostrado ser efectivo en contextos andinos para evaluar los agroecosistemas o sistemas de producción pecuaria y agrícola (Vallejo et al., 2020; Tongo and Soplín, 2022).

A nivel global, la sostenibilidad debe estar alineada con los ODS, que ofrecen un marco de acción para abordar problemas globales comunes y desarrollar políticas adaptadas a los contextos locales (United Nations, 2015; Persson et al., 2016). Adicionalmente, los Principios CSA-IRA buscan garantizar inversiones responsables en agricultura y sistemas de riego, aunque su carácter no vinculante representa un desafío para los productores ante conflictos con inversionistas (Stephens, 2013).

En Ecuador, debido a la organización comunitaria que gestiona los sistemas de riego, surge la necesidad de contar con herramientas que permitan evaluar su sostenibilidad considerando las realidades locales, sin perder de vista los objetivos globales. Por ello, esta investigación tiene como objetivo definir los indicadores para evaluar la sostenibilidad de los sistemas de riego en Ecuador dentro del marco metodológico MESMIS, considerando su relación con los ODS y los Principios CSA-IRA.

2 Materiales y Métodos

2.1 Área de Estudio

La investigación se realizó en Ecuador, ubicado en la costa noroeste de América del Sur que está atravesado por la línea equinoccial y con alturas que van de 0 a 6263 m.s.n.m. La mayor área bajo riego está principalmente en Guayas (260 000 ha), Chim-

borazo (124 000 ha) y Pichincha (107 000 ha); de esta superficie, el 22% corresponde a sistemas de riego públicos, 40% comunitarios y 38% privados (Gaybor, 2019). Existen 3 425 sistemas de riego comunitarios distribuidos mayoritariamente en los Andes ecuatorianos. Estos sistemas han sido construidos por los usuarios mediante trabajos comunitarios (mingas) en zonas montañosas de alta pendiente, y benefician a predios menores a 1 ha en promedio. Los regantes se dedican a la agricultura de subsistencia y viven en condiciones precarias que los obliga a trabajar fuera de la unidad productiva agropecuaria (UPA) (Gaybor, 2019).

Considerando los tipos de sistemas de riego intercomunitarios, comunitarios, colectivos y públicos (Cachipiendo Ulcuango et al., 2021), en el estudio se identificaron 3 sistemas de riego intercomunitarios en las provincias de Tungurahua, Pichincha y Cotopaxi; 12 comunitarios: 1 de Carchi, 2 de Imbabura, 3 de Pichincha, 2 de Cotopaxi, 2 de Tungurahua y 2 de Chimborazo; 4 sistemas de riego colectivos o asociados en Pichincha y 1 sistema público en Carchi.

2.2 Alcance de la investigación y definición de los indicadores

La investigación tuvo un alcance descriptivo y correlacional, y se desarrolló basándose en la metodología MESMIS, complementada con la técnica del Panel Delphi (consulta a expertos). Esta combinación metodológica permitió identificar y definir un conjunto de 31 indicadores destinados a evaluar la sostenibilidad de los sistemas de riego. El proceso se estructuró en cuatro etapas (Figura 1).

- (i) Definición del modelo de funcionamiento del sistema de riego. Esta etapa se desarrolló a través de seis grupos focales, en los que participaron 36 líderes comunitarios. Como instrumento de recolección de información se utilizó una guía estructurada con diez preguntas sobre la gestión y el manejo del sistema de riego.
- (ii) Identificación de criterios de diagnóstico y puntos críticos del sistema de riego, siguiendo los lineamientos de la metodología MESMIS (Masera et al., 2000; Astier et al., 2008). Se aplicaron entrevistas semiestructuradas y encuestas a un grupo de 18 informantes clave: 6

técnicos, 4 académicos y 8 estudiantes de posgrado, delimitando así los principales criterios de evaluación de la sostenibilidad de los sistemas de riego.

- (iii) Definición de indicadores. En esta etapa se conformó un Panel Delphi con 12 expertos en gestión y manejo de sistemas de riego, provenientes de instituciones gubernamentales, universidades y el sector privado. El proceso incluyó dos rondas de consulta: la primera centrada en la validez conceptual y pertinencia de los indicadores propuestos, y la segunda orientada a determinar el grado de incidencia de cada indicador en la sostenibilidad

del sistema.

- (iv) Análisis de los indicadores en relación con los ODS y los Principios CSA-IRA. Se realizó un análisis semántico que permitió establecer la correspondencia y alineación de los indicadores con estos marcos internacionales de referencia. A partir de este análisis, se observa que los indicadores definidos para la evaluación de sistemas de riego comunitarios están alineados con 10 ODS y 7 Principios CSA-IRA (Tabla 1). Esto subraya el potencial de los sistemas de riego en pleno funcionamiento para contribuir al cumplimiento de los objetivos globales de desarrollo sostenible.

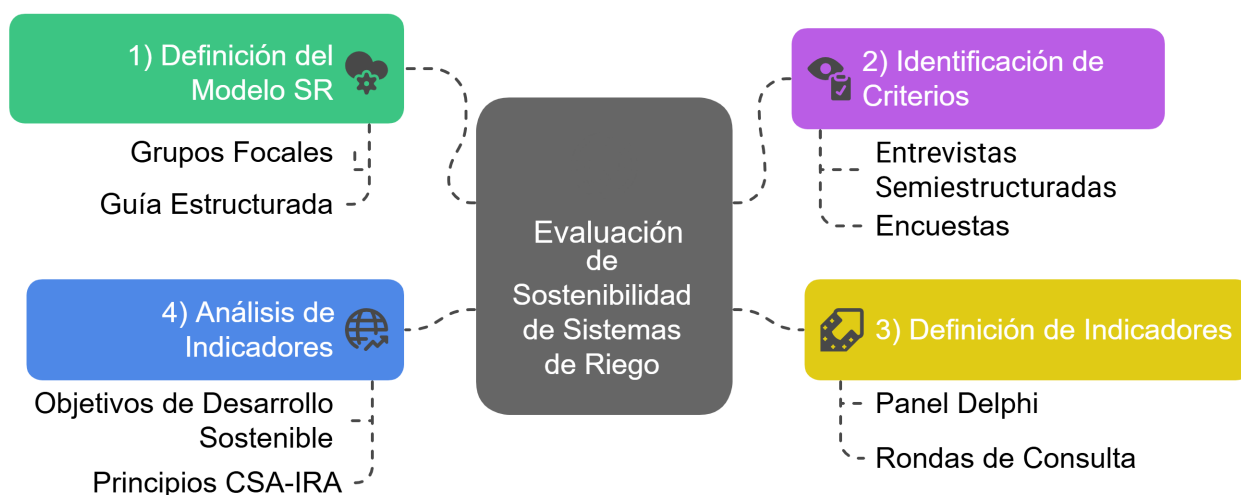


Figura 1. Etapas y técnicas para la construcción de indicadores para la evaluación de sistemas de riego.

3 Resultados

Los resultados de esta investigación reflejan un enfoque metodológico integral para evaluar la sostenibilidad de sistemas de riego comunitarios en el contexto andino ecuatoriano. A través del modelo MESMIS y la técnica Delphi, se estructuró un diagnóstico que permitió identificar los elementos clave del sistema de riego: naturaleza, comunidad e infraestructura, así como los principales puntos críticos que afectan su desempeño. Se definieron 31 indicadores alineados con siete atributos de sostenibilidad y cinco dimensiones (ambiental, social, económica, tecnológica y política), articulados con nueve ODS y siete Principios CSA-IRA. Los hallazgos evidencian

limitaciones estructurales, organizativas y técnicas que condicionan la eficiencia hídrica, la equidad en la distribución, la gobernanza y la resiliencia de estos sistemas, proporcionando una base sólida para el diseño de políticas públicas y estrategias de fortalecimiento comunitario.

3.1 Modelo de funcionamiento del sistema de riego

El modelo de funcionamiento de un sistema de riego gestionado comunitariamente se basa en tres elementos fundamentales: naturaleza, comunidad e infraestructura (Figura 2). El subsistema natura-

leza incluye las entradas de agua al sistema, que dependen de factores exógenos como temperatura, precipitación, viento y radiación. En el caso de la Sierra ecuatoriana, las fuentes principales de agua son las nieves perpetuas de los Andes y los páramos, cuyos ecosistemas de bosques altoandinos capturan el agua, liberándola en zonas bajas mediante manantiales o escorrentías (Llambí et al., 2012). Sin embargo, las actividades antropogénicas, como la expansión de la frontera agrícola, la quema de páramos y el pastoreo, disminuyen la capacidad de recarga de los acuíferos, constituyendo factores internos relevantes que afectan al sistema.

El subsistema comunidad abarca las acciones humanas que, a nivel individual, comunitario o colectivo, impactan la eficiencia física, económica, social y ambiental en el uso del agua agrícola. La gestión del agua en los sistemas de riego implica llevar a cabo procedimientos específicos para acceder, conducir, almacenar, distribuir y aplicar el agua de manera eficiente, minimizando desperdicios. Se identificaron cuatro factores principales en este subsistema: i) Conocimiento: Relacionado con el grado de comprensión de los usuarios, ya sea de forma individual o comunitaria, respecto al tiempo de riego óptimo según el tipo de cultivo; ii) Participación social: Incluye la implicación de los usuarios en

actividades comunitarias, procesos de toma de decisiones y programas de capacitación y formación; iii) Institucional: Referente a la capacidad de la organización para operar, mantener y administrar el sistema, se consideran también otros aspectos como la gestión de turnos de agua, alternabilidad en los liderazgos y tipo de organización; iv) Económico: Incluye la capacidad financiera de los usuarios y organizaciones para acceder al financiamiento, mantener y renovar el sistema, así como la existencia de políticas que respalden estas actividades.

El subsistema infraestructura comprende los componentes físicos que permiten la captación, conducción, almacenamiento, distribución y aplicación del agua al cultivo de manera eficiente. La innovación tecnológica es un aspecto clave, ya que los niveles tecnológicos varían en función del tipo y tamaño del sistema de riego. En los casos estudiados, los sistemas de riego predominantes son los de aspersión y goteo, que destacan por su nivel de presurización, automatización y métodos que minimizan las pérdidas de agua. La infraestructura eficiente no solo reduce el desperdicio de agua, sino también optimiza su aplicación, garantizando la sostenibilidad del sistema.

Tabla 1. ODS y principios IRA que se relacionan con los indicadores de sostenibilidad de los sistemas de riego en el Ecuador. Tomada de (Garcés and Padilla, 2020).

ODS		Principios CSA - IRA	
2	Hambre cero	1	Contribuir a la seguridad alimentaria y la nutrición
5	Igualdad de género	2	Contribuir al desarrollo económico sostenible e inclusivo y a la erradicación de la pobreza
6	Agua limpia y saneamiento		
8	Trabajo decente y crecimiento económico	3	Fomentar la igualdad de género y el empoderamiento de las mujeres
9	Industria, innovación e infraestructura	6	Conservar y ordenar de forma sostenible los recursos naturales, aumentar la resiliencia y reducir el riesgo de catástrofes
10	Reducción de las desigualdades		
11	Ciudades y comunidades sostenibles	7	Respetar el patrimonio cultural, los conocimientos tradicionales y respaldar la diversidad y la innovación
12	Producción y consumo responsable	8	Promover sistemas agrícolas y alimentarios inocuos y saludables
15	Vida de ecosistemas terrestres	9	Incorporar estructuras de gobernanza, procesos y mecanismos de reclamación inclusivos y transparentes
16	Paz, justicia e instituciones sólidas		

3.2 Criterios de diagnóstico y puntos críticos del sistema de riego

Se identificaron 13 criterios de diagnóstico que cubren los 7 atributos de sostenibilidad. Luego, se vincularon 21 puntos críticos, mismos que se relacionan con las dimensiones de la sostenibilidad y los elementos del sistema (Tabla 2).

Los puntos críticos identificados se organizaron según los atributos clave de sostenibilidad definidos en la metodología. Esta clasificación permite un análisis sistemático de las principales debilidades y oportunidades de mejora en los sistemas de riego comunitarios. A continuación, se presentan los hallazgos correspondientes a cada atributo de sostenibilidad.

Tabla 2. Puntos críticos identificados para la sostenibilidad de sistemas de riego comunitarios en los Andes ecuatorianos.

Atributos	Criterios de diagnóstico	Puntos críticos	Dimensiones de sostenibilidad	Elementos del sistema
1. Productividad	Eficiencia del sistema	Desperdicio de agua en los diferentes componentes de la infraestructura y en la aplicación en parcela.	Ambiental	Naturaleza
			Tecnológica	Infraestructura
	Rendimiento del uso del agua	Utilización del riego en los cultivos con baja rentabilidad, generando pocas oportunidades de empleo	Económica	Comunidad
			Social	
		Desconocimiento de la relación de los beneficios de la inversión con respecto al retorno económico de la producción.	Económica	Comunidad
		Alto monto de inversión por proyecto de riego	Económica	Comunidad
2. Estabilidad	Conservación, calidad y protección de los recursos	Disminución de la disponibilidad del agua por el deterioro de fuentes de agua debido a acciones antropomórficas.	Ambiental	Naturaleza
			Tecnológica	Infraestructura
		Contaminación de cuerpos de agua por actividad agrícola.	Ambiental	Naturaleza
		Predominio de monocultivos.	Ambiental	Naturaleza
3. Confiabilidad	Relación entre los ingresos del sistema y los costos	Recursos de autogestión insuficientes para realizar actividades de mantenimiento de reparación y/o reposición del sistema.	Económica	Infraestructura
			Social	Comunidad
4. Resiliencia	Mecanismos para evitar riesgos	Inexistencia de prácticas para evitar la evapotranspiración.	Ambiental	Naturaleza
		No se implementan acciones que fomenten la retención del agua en el suelo.	Ambiental	Naturaleza
	Tecnificación del riego	Existe 40% de sistemas que no presurizan el agua para regar.	Tecnológica	Infraestructura
5. Adaptabilidad	Procesos de aprendizaje y capacitación	Los usuarios del riego desconocen las alternativas eficientes del uso del agua.	Tecnológica	Comunidad
	Capacidad de cambio e innovación	Los usuarios del riego rechazan los cambios técnicos y sociales	Tecnológica	Comunidad

6. Equidad	Distribución equitativa del agua y género	La distribución del agua aún se realiza sin considerar el tipo de cultivo y la superficie	Político	Comunidad
		Los jóvenes y mujeres no participan en los niveles dirigenciales de la organización.	Político	Comunidad
	Distribución de costos y beneficios	Las tarifas se establecen por usuario sin considerar la rentabilidad de la actividad productiva y el consumo del agua.	Económico	Comunidad
7. Auto dependencia (autogestión)	Capacidad de la organización para la gestión y manejo del sistema	Existen conflictos entre los sistemas de riego y usuarios por el acceso y uso del agua.	Social	Comunidad
		La gobernanza del agua entre las organizaciones de los usuarios y el Estado es débil y causa conflictos.	Político	Comunidad
		El liderazgo en muchas ocasiones se lleva a cabo por personas que desconocen la dinámica de los sistemas de riego.	Social	Comunidad
	Nivel de participación en la gestión y manejo del sistema	Existe participación de los usuarios; sin embargo, se realiza considerando solo al usuario y no la superficie para el trabajo o los aportes.	Social	Comunidad
	Dependencia de insumos y factores externos	Administración de recursos económicos ineficiente, no se reinvierte en el sistema	Económica	Comunidad

3.3 Productividad

Los sistemas de riego garantizan la provisión oportuna y de calidad de agua para incrementar la productividad en las áreas regadas Morris (2019); Contero and Cachipueno (2021). La evaluación requiere considerar su eficiencia técnica, económica y social, identificando puntos críticos como el desperdicio de agua debido al deterioro de la infraestructura o el manejo inadecuado, los cuales pueden resolverse mediante acciones de mejora y capacitación de los regantes. Otro diagnóstico clave es el rendimiento del uso del agua, que incluye aspectos críticos como la baja rentabilidad de los cultivos, la relación beneficio-costos y la generación de empleo.

3.4 Estabilidad

Este atributo evalúa la conservación, calidad y protección de los recursos. En la dimensión ambien-

tal, los puntos críticos incluyen contaminación y escasez del agua, así como predominio de monocultivos. Un sistema de riego comunitario sostenible requiere una disponibilidad suficiente de agua en cantidad y calidad, asegurada mediante la protección de fuentes hídricas y promoción de sistemas de producción biodiversos. La sostenibilidad del suelo también es un factor relevante en este atributo.

3.5 Confiabilidad

La confiabilidad se aborda desde un único criterio de diagnóstico que son los ingresos al sistema y costos. Los puntos críticos incluyen costos de operación y mantenimiento, así como los ingresos generados por el sistema en la dimensión económica. En la dimensión social, se identifican normativas insuficientes o ineficaces para la gestión y manejo del sistema de riego.

3.6 Resiliencia

Este atributo evalúa la capacidad del sistema de riego para aplicar medidas que reduzcan los riesgos y fortalezcan su resistencia frente al cambio climático en contextos agrícolas (Ward, 2022). En la dimensión ambiental, se identificaron dos puntos críticos: la falta de prácticas para reducir la evapotranspiración y la ausencia de acciones que favorezcan la retención de agua en el suelo. En la dimensión tecnológica se detectó un punto crítico relacionado con el bajo nivel de tecnificación del riego.

3.7 Adaptabilidad

El sector agrícola enfrenta una competencia creciente por el agua debido a su condición de mayor consumidor del recurso y a los efectos del cambio climático. Este atributo evalúa la capacidad de adaptación mediante dos criterios: el fortalecimiento de procesos de aprendizaje y capacitación en uso eficiente del agua, y capacidad de cambio e innovación tecnológica en el riego (van Opstal et al., 2022).

3.8 Equidad

La equidad en la distribución de los recursos hídricos es crucial para evitar conflictos, y puede ser abordada mediante la doctrina de la "distribución equitativa" (Elmusa, 1994). Este atributo considera la distribución del agua según los requerimientos hídricos de los cultivos, el área bajo riego, y la participación de jóvenes y mujeres (dimensión social). Además, evalúa las tarifas establecidas con base en el presupuesto, la superficie y la rentabilidad del cultivo (dimensión económica).

3.9 Autosuficiencia y Autogestión

Los sistemas de riego comunitarios enfrentan limitaciones significativas en términos de autosuficiencia y autogestión (Cortez, 2000). Este atributo se analiza a través de criterios como el empoderamiento de los regantes para organizarse y manejar los recursos económicos (dimensión social-gobernanza), el nivel de participación en la gestión del sistema (dimensión social), y la dependencia de insumos y factores externos al sistema (dimensión económica).

3.10 Relación de indicadores de evaluación de sistemas de riego con los ODS y Principios CSA-IRA

Además del análisis interno de los sistemas de riego, resulta fundamental vincular los indicadores definidos con marcos de referencia globales que orientan la sostenibilidad. Esta integración permite evaluar no solo el desempeño local, sino también la contribución de estos sistemas al cumplimiento de los compromisos internacionales (Tabla 3). En cuanto a los atributos del MESMIS, a continuación se describen los indicadores que corresponden a cada uno de ellos.

Productividad: Se identificaron siete indicadores relacionados con el uso eficiente del agua y la productividad económica, abarcando las dimensiones social, ambiental, económica y tecnológica. Estos indicadores están vinculados a los ODS 8, 9 y 12, y a los Principios CSA-IRA 1, 2 y 6.

Estabilidad: Cuatro indicadores reflejan la importancia de la disponibilidad y calidad del agua, asociados a los ODS 2, 6, 11 y 15, y a los Principios CSA-IRA 1, 6 y 7.

Confiabilidad: Dos indicadores abarcan aspectos de las dimensiones económica y social, relacionados con los ODS 8, 10 y 16, y los Principios CSA-IRA 2 y 9.

Resiliencia: Tres indicadores miden la capacidad de resistencia ante cambios climáticos, vinculándose con los ODS 3 y 5, y los Principios CSA-IRA 1, 6 y 8.

Adaptabilidad: Dos indicadores evalúan la capacidad de innovación tecnológica y adaptación de los regantes, asociados a los ODS 12 y 11, y a los Principios CSA-IRA 3 y 7.

Equidad: Cinco indicadores abordan la participación de mujeres y jóvenes, la transición generacional y el acceso equitativo al agua, relacionados con los ODS 2, 5, 9, 10 y 16, y los Principios CSA-IRA 1, 3 y 7.

Autosuficiencia y Autogestión: Este atributo cuenta con nueve indicadores relacionados con la gobernanza y sostenibilidad económica, vinculados

a los ODS 10 y 16, y a los Principios CSA-IRA 2, 7 y 9.

Estos indicadores ofrecen una base integral para evaluar la sostenibilidad de los sistemas de riego en función de sus contribuciones a los ODS y los Principios CSA-IRA, permitiendo diseñar estra-

tegias orientadas a su mejora continua. A continuación, se presenta la descripción detallada de los 31 indicadores definidos. Esta sección incluye la conceptualización, el método de cálculo y la unidad de medida, lo que permite su aplicación práctica en la evaluación de la sostenibilidad de los sistemas de riego comunitarios.

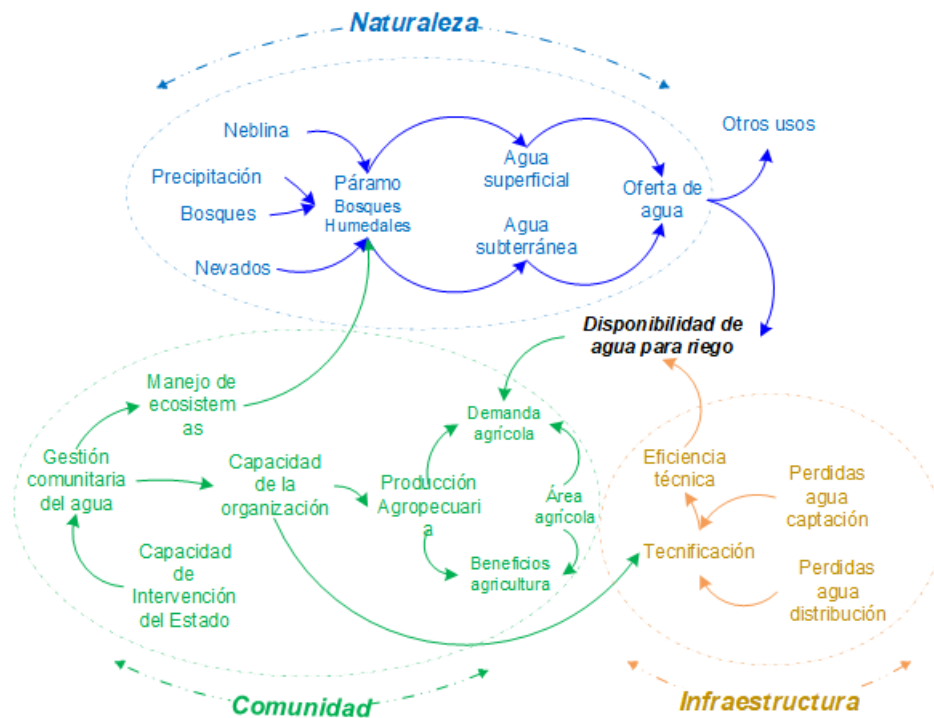


Figura 2. Modelo de funcionamiento del sistema de riego comunitario.

Eficiencia del sistema desde la captación hasta la parcela

Para calcular la eficiencia se considera la sumatoria de los caudales de las parcelas bajo riego dividido para el caudal de ingreso en la bocatoma y se expresa en porcentaje en la ecuación 1.

$$E(\%) = \frac{\sum Q_{\text{ingreso a las parcelas}}}{Q_{\text{captación}}} \times 100\% \quad (1)$$

Eficiencia de aplicación del agua en la parcela

Es la relación existente entre las necesidades hídricas del cultivo y el agua aplicada por el emisor (aspersor o goteo) en la UPA, expresada en porcentaje

en la ecuación 2. Siendo: EA = eficiencia de aplicación a nivel de UPA; NHc = necesidades hídricas del cultivo; Aasp = agua aplicada por el emisor en la UPA (Playan, 1994).

$$EA(\%) = \frac{NHc}{Aasp} \quad (2)$$

Relación retorno económico y volumen de agua utilizada

Es la relación entre la utilidad monetaria producida por el cultivo y el volumen de agua utilizada, se expresa en USD. m^{-3} de acuerdo con Ríos et al. (2016).

$$Y_1 = \frac{\text{Utilidad}(USD)}{V(m^3)} \quad (3)$$

Relación del volumen de agua usada con el número de empleos generados

Mide el número de empleos agrícolas producidos por hectómetro cúbico (1 millón de m^3) de agua empleada en el riego (Hussain et al., 2007).

$$Y_2 = \frac{\text{Empleos}(u)}{V(m^3)} \quad (4)$$

Relación beneficio costo

Para calcular esta relación se realiza la suma de los ingresos totales de la producción agrícola con riego para 10 años dividida para los costos totales de la inversión del sistema de riego y de la implementación del cultivo según la ecuación 5.

$$\frac{B}{C}(USD) = \frac{\text{Ingresos totales}}{\text{Costos totales}} \quad (5)$$

Monto de inversión por hectárea

Se expresa en dólares estadounidenses por hectárea (USD/ha), y permite comparar de manera estandarizada el nivel de inversión económica realizado en distintas áreas bajo riego, facilitando el análisis de eficiencia y equidad en la asignación de recursos.

Monto de inversión por usuario de riego

Este monto se determina considerando los costos totales de la inversión del sistema de riego en relación con el número de usuarios del sistema de riego según la ecuación 6. Siendo: MIUR = Monto en dólares de inversión por usuario de riego; NUSR = número de usuarios del sistema de riego.

$$MIUR = \frac{\text{Costos totales}}{NUSR} \quad (6)$$

Índice de escasez

Se determina mediante la relación entre la demanda de agua para el uso agrícola y de riego con la oferta de agua disponible en el punto de captación (bocatoma) según la ecuación 7. Siendo: D = demanda de

agua para riego (m^3); Oh = oferta hídrica en la bocatoma (m^3); Ic = Índice de escasez se expresa en % (Ríos et al., 2016).

$$Ic = \frac{D}{Oh} \times 100 \quad (7)$$

Prácticas de conservación de fuentes de agua

Las organizaciones de regantes realizan prácticas de conservación, mismas que se pueden cuantificar: forestación, cercado, manejo de la carga animal, no intervención de los sitios de las fuentes, y pueden ser expresadas en unidades y luego establecer una escala de valoración.

Índice de calidad del agua

Fundamentado en el modelo conceptual del índice de calidad del agua del Consejo Canadiense de Ministros de Medio Ambiente (CCMEWQI); su cálculo se obtiene aplicando la ecuación 8. El alcance (F1) expresa el porcentaje de parámetros que no cumplen con los niveles deseables (límites máximos permitidos) respecto al total de parámetros. La frecuencia (F2) se obtiene por la relación entre el número de resultados que no cumplieron con los niveles deseables respecto al total de resultados. La amplitud (F3) es una medida de la desviación que existe en los datos, determinada por la magnitud.

$$CCMEWQI = 100 - \frac{\sqrt{F1^1 + F2^2 + F3^2}}{1,732} \quad (8)$$

Diversidad de cultivos en las UPA

Se adaptó el Índice de Shannon-Wiener para este cálculo, como se detalla a continuación de los excesos de cada dato fuera de rango al compararlo con su umbral (Chidiac et al., 2023). Donde P_i es la proporción de individuos de la i -ésimo cultivo y se calcula de la siguiente manera $P_i = n_i/N$, N es el número total de individuos; n_i es el número de plantas por cultivos, N el número de todas las plantas de todos los cultivos y S es el número de especies (Valdez et al., 2018).

$$DC = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i \quad (9)$$

Relación de costos de operación, mantenimiento y administración con los ingresos

Para calcular esta relación se realiza primero la suma de los costos totales anuales en operación, mantenimiento y administración dividida para los ingresos netos de la producción anual como se detalla en la ecuación 10.

$$\frac{C}{I} = \frac{\text{Costo de operación, mantenimiento y administración}}{\text{Ingresos de la producción anual}} \quad (10)$$

Existencia de normativas para la gestión y manejo del sistema

Este indicador evalúa la presencia y aplicación de normativas internas que regulan la operación, mantenimiento y administración del sistema de riego. Estas normativas son esenciales para una gobernanza eficaz, ya que establecen reglas claras que guían la toma de decisiones, promueven la participación y previenen conflictos (Perugachi and Cachipueno, 2000). La ausencia o debilidad de estas normas indica un bajo nivel de gobernanza y puede comprometer la sostenibilidad institucional del sistema. Se expresa en escala de 1 a 5 donde: 1 = inexistente, 2 = muy débil, 3 = parcialmente aplicada, 4 = aplicada con limitaciones, 5 = plenamente aplicada y funcional.

Generación de microclimas, mediante cortinas rompe vientos

Es la relación entre el número de fincas que implementan cortinas rompe vientos y el número de fincas totales; se expresa en porcentaje.

Incorporación de materia orgánica en el suelo

Es la relación entre el número de UPAs que incorporan la materia orgánica con respecto a las totales, y se expresa en porcentaje. También se puede complementar anotando la cantidad de MO y contenido de humedad en el suelo (Tácuna et al., 2015).

Nivel de tecnificación de los sistemas de riego

Dependerá de la infraestructura existente y su estado, así como también del método de riego utilizado, y se expresa en una escala de 1 a 5.

Nivel de conocimientos de la cantidad de agua a aplicar en la parcela

Es la relación entre los conocimientos del regante con conocimientos básicos de la aplicación del agua en la parcela. Se mide en base a la escala de valores: muy bueno, bueno, regular y malo (Hussain et al., 2007).

Nivel de aceptación de cambios tecnológicos y sociales

Se evalúa la apropiación de tecnología y prácticas agrícolas innovadoras en el agroecosistema; se propone como condición deseable siete o más prácticas innovadoras en los últimos cinco años y se expresa en porcentaje (Fonseca-Carreño et al., 2016).

Distribución del agua según las necesidades hídricas del cultivo y la superficie

Para esta distribución (caudal) se consideran las necesidades hídricas según el tipo de cultivo (q) multiplicado por el área de producción (A) según la ecuación 11.

$$Q = q(L/s/ha) \times A(ha) \quad (11)$$

Mujeres y hombres que participan en la directiva de la organización

La participación de los actores en los sistemas comunitarios es fundamental en especial la de las mujeres, y evidencia una gestión más equitativa que garantiza a la vez su derecho al agua. Se estima como el porcentaje de mujeres en la directiva de la organización con respecto al total de miembros (Chidiac et al., 2023).

Jóvenes que participan en la directiva de la organización

De igual forma, la participación de jóvenes en la directiva evidencia la sostenibilidad social en términos de transición entre los actores para asumir la gestión del agua. Se estima como el porcentaje de jóvenes en la directiva de la organización con respecto al total de miembros (Chidiac et al., 2023).

Régimen tarifario basado en el presupuesto anual

Este indicador informa la sostenibilidad económica, y dependiendo de los componentes que se consideran dentro del presupuesto se podrá realizar una

gestión y manejo eficiente del sistema de riego; se expresa en la existencia y grado de cumplimiento con una escala del 1 al 5.

Tarifificación en base a superficie y rentabilidad del cultivo

Este indicador evalúa si el sistema de riego aplica tarifas diferenciadas según la superficie cultivada y la rentabilidad de los cultivos irrigados. Una estructura tarifaria basada en estos criterios promueve la equidad y eficiencia económica en la gestión del recurso hídrico, al considerar la capacidad productiva de cada unidad agrícola. Unidad de medida escala cualitativa del 1 al 5.

Gestión de proyectos

La capacidad de la organización para generar y financiar proyectos es un indicador del nivel de planificación estratégica y operativa para mejorar el sistema. Se estima como alta: 5-4 proyectos; media 3-1 proyectos y baja 0 (Arnés et al., 2013).

Articulación de acciones con las instituciones públicas

Este indicador tiene que ver con la gobernanza de los sistemas y evidencia el nivel de coordinación de la organización con las instituciones públicas a fin de lograr el financiamiento para proyectos, asistencia técnica, crédito, capacitación y otras acciones como parte de la implementación de políticas y marcos legales nacionales o locales (Cobo et al., 2018). Se estima como nivel alto: 5-4 acciones; media 3-1 acciones y baja 0 o ninguna.

Articulación de acciones con instituciones de la sociedad civil

Al igual que la articulación con instituciones públicas, este indicador indica la gobernanza entre los actores de la sociedad civil, que pueden ser organizaciones de regantes vecinas y de la misma cuenca o subcuenca (Cobo et al., 2018). Se estima como nivel alto: 5-4 acciones; media 3-1 acciones y baja 0 o ninguna.

Nivel de democracia y alternancia de dirigentes

Este indicador se estimará en la medida de que se haya identificado en los puntos críticos de la organización. Es de carácter cualitativo. Se estima mediante escala categórica: alto cuando se cumple lo

que establece la normativa respecto a la elección y renovación de dirigencias y toma de decisiones; medio si se cumple parcialmente; y bajo cuando no se cumple (González et al., 2006).

Nivel de conocimientos en gestión y manejo del sistema por parte de los dirigentes

Este indicador mide el grado de conocimiento que poseen los dirigentes de los sistemas de riego sobre los aspectos técnicos, sociales, ambientales y de gobernanza relacionados con el uso y manejo del agua. Un nivel adecuado de conocimientos es fundamental para asegurar una gestión eficaz, fortalecer la sostenibilidad social y facilitar la implementación de normativas que prevengan conflictos dentro y fuera de la organización (González et al., 2006). Unidad de medida: escala cualitativa del 1 al 5, donde: 1 = conocimiento nulo, 2 = conocimiento básico, 3 = conocimiento medio, 4 = conocimiento alto, 5 = conocimiento integral y aplicado de forma efectiva.

Nivel de equidad en aportes de trabajo para el mantenimiento en función de la superficie

El manejo y gestión del sistema requieren la participación de todos los usuarios, sin embargo, un punto crítico es la inequidad en los trabajos de mantenimiento. La participación en los trabajos de acuerdo con la superficie que tiene cada usuario indica la equidad. Es un indicador cualitativo: alto= si, bajo= no.

Administración del sistema de riego

Este indicador informa las prácticas que son indispensables para el manejo económico eficiente del sistema. La sostenibilidad se verá reflejada por la existencia de tres instrumentos básicos: la planificación, el presupuesto y la contabilidad. Así, se estimará como alta cuando tienen los 3 instrumentos, media cuando tienen 2 y baja cuando tiene 1 o ninguno.

Reinversión en el sistema de riego

Para este indicador se considerará el Rendimiento de Reinversión (RR) según la ecuación 12.

$$RR = \frac{\text{Flujos de efectivo totales generados}}{\text{Flujos de efectivo totales reinvertidos}} - 1 \quad (12)$$

Tabla 3. Indicadores en relación con los ODS y Principios CSA-IRA.

AtributosN°	Indicadores de sostenibilidad				Relación ODS-CSA-IRA			
	Descripción	Unidad de Medida	Valor Mínimo	Valor Máximo	ODS	Metas	Principios CSA- IRA	
A1	1	Eficiencia del sistema desde la captación hasta la parcela	%	50	90	9	9.5 Aumentar la investigación científica y capacidad tecnológica.	6
	2	Eficiencia de aplicación del agua en la parcela	%	50	96	9	9.5 Aumentar la investigación científica y capacidad tecnológica	1
						12	12.2. Lograr el uso eficiente de los recursos naturales	6
	3	Relación retorno económico y volumen de agua utilizada	m3/\$	0,1	10	8	8.4. Mejorar la producción y consumo eficiente y respetuoso	2
	4	Relación de volumen de agua usada con el número de empleos generados	m3/jornales	0,1	10	8	8.5. Lograr el pleno empleo y trabajo decente.	2
	5	Relación beneficio-costos	unidad	0,1	1	8	8.2. Elevar la productividad a través de la diversificación, tecnología e innovación.	1
	6	Monto de inversión por hectárea	\$/ha	500	4000			2
	7	Monto de inversión por usuario de riego	\$/usuario	100	4000			
A2	8	Índice de escasez	%	40	90	9	9.5 Aumentar la investigación científica y la capacidad tecnológica.	6
						11	11.1. Apoyar a los vínculos zonas urbanas, periurbanas y rurales.	
	9	Prácticas de conservación de fuentes de agua	unidad	1	5	11	11.4 Proteger el patrimonio cultural y natural.	6
						15	15.1 Asegurar la conservación y uso sostenible de los ecosistemas.	
	10	Índice de calidad del agua	%	50	100	6	6.3 Mejorar la calidad de agua. Reducir la contaminación y aguas residuales.	6
	11	Diversidad de cultivos en las UPA	%	50	100	2	2.5 Mantener la diversidad genética de semillas.	17
						15	15.4 Asegurar la conservación de ecosistemas montañosos.	
A3	12	Relación de costos de operación, mantenimiento y administración con los ingresos	unidad	1	5	8	8.2 Elevar la productividad a través de la diversificación, tecnología e innovación.	2
						10	10.1. Promover el crecimiento de los ingresos del 40% en la población pobre.	
	13	Existencia de normativas para la gestión y manejo del sistema	unidad	1	5	16	16.b Fortalecer la participación de los países en desarrollo en OOII.	9
A4	14	Generación de microclimas, mediante cortinas rompe vientos.	%	50	100	2	2.4 Realizar prácticas agrícolas sostenibles y duraderas.	6
	15	Incorporación de materia orgánica en el suelo	%	50	100			1
							8	

	16	Nivel de tecnificación de los sistemas de riego	unidad	1	5	9	9.5. Aumentar la investigación científica, y la capacidad tecnológica.	1
								8
A5	17	Nivel de conocimientos de la cantidad de agua a aplicar en la parcela	unidad	1	5	12	12.2 Lograr el uso eficiente de los recursos naturales.	3
	18	Nivel de aceptación de los cambios tecnológicos y sociales	unidad	1	5	11	11.a Apoyar a los vínculos de las zonas urbanas, periurbanas y rurales.	7
A6	19	Distribución del agua según las necesidades hídricas del cultivo y superficie	unidad	1	5	2	2.4 Realizar prácticas agrícolas sostenibles y resilientes.	1
	20	Mujeres y hombres que participan en la directiva de la organización	unidad	1	5	5	5.5 Asegurar el acceso a la salud sexual y reproductiva y a los derechos reproductivos.	3
	21	Jóvenes que participan en la directiva de la organización	unidad	1	5	10	10.3 Garantizar la igualdad de oportunidades.	3
						16	16.b Promover y aplicar leyes y políticas (DDHH).	
	22	Régimen tarifario basado en el presupuesto anual	unidad	1	5	9	9.5 Aumentar la investigación científica y la capacidad tecnológica.	7
	23	Tarifificación en base a superficie y rentabilidad del cultivo	unidad	1	5			
A7	24	Capacidad de la organización en gestión de proyectos	unidad	1	5	10	10.3 Garantizar la igualdad de oportunidades	7
						16	16.b Promover y aplicar leyes y políticas (DDHH).	
	25	Articulación de acciones con las instituciones públicas	unidad	1	5	16	16.6 Crear instituciones eficaces y transparentes.	9
	26	Articulación de acciones con las instituciones de la sociedad civil	unidad	1	5		16.7 Fomentar la participación ciudadana.	
	27	Nivel de alternancia de los dirigentes	unidad	1	5			
	28	Nivel de conocimientos en gestión y manejo del sistema por parte de los dirigentes	unidad	1	5			
	29	Nivel de equidad en los aportes de trabajo para el mantenimiento en función de la superficie	unidad	1	5			
	30	Administración financiera del sistema de riego	unidad	1	5	16	16.5 Reducir la corrupción y soborno.	2
	31	Reinversión en el sistema de riego	unidad	1	5		16.6 Crear instituciones eficaces y transparentes.	

4 Discusión

El presente estudio logró definir 31 indicadores para evaluar la sostenibilidad de los sistemas de riego

comunitarios en Ecuador, alineados con los ODS y los Principios CSA-IRA. Esta definición se realizó mediante una metodología participativa basada en el enfoque MESMIS y la técnica del Panel Delphi,

lo que permitió considerar las particularidades de los sistemas de riego en el contexto andino ecuatoriano. Se identificaron tres componentes esenciales: naturaleza, comunidad e infraestructura. Estos elementos, estrechamente interrelacionados, reflejan las dinámicas ecológicas, sociales y técnicas que configuran la gestión del riego en los territorios andinos (Cachipuendo Ulcuango, 2021; Mazabel and Caldera, 2018). La caracterización del modelo permitió entender cómo los factores endógenos (capacidad organizativa, gestión interna, tecnificación) y exógenos (variabilidad climática, presión sobre fuentes hídricas) afectan la sostenibilidad de los sistemas.

El análisis de 13 criterios de diagnóstico y 21 puntos críticos distribuidos en siete atributos (productividad, estabilidad, confiabilidad, resiliencia, adaptabilidad, equidad y autogestión) evidenció las debilidades estructurales comunes. Por ejemplo, en el atributo productividad, se observaron deficiencias en la eficiencia del sistema y baja rentabilidad de los cultivos irrigados (Morris, 2019; Contero and Cachipuendo, 2021), lo que repercute en la viabilidad económica y el uso racional del recurso hídrico.

La estabilidad del sistema mostró riesgos importantes asociados a la degradación de las fuentes de agua y pérdida de biodiversidad, en línea con estudios previos que advierten sobre el deterioro de los ecosistemas de páramo (Llambí et al., 2012). Asimismo, la baja implementación de las prácticas conservacionistas refuerza la necesidad de enfoques que integren la gestión ambiental con la planificación productiva (Chile and Ortiz, 2021).

En cuanto a la confiabilidad, la limitada capacidad financiera para el mantenimiento y la operación del sistema y la escasa implementación de normativas internas son factores que debilitan su sostenibilidad económica e institucional (Perugachi and Cachipuendo, 2000). Este hallazgo coincide con los estudios que vinculan la gobernanza del agua con la presencia de normas claras y mecanismos de participación efectiva (Cobo et al., 2018).

El atributo resiliencia reveló escasos mecanismos para enfrentar el estrés climático, como la tecnificación del riego y prácticas para conservar la humedad en el suelo (Ward, 2022), lo cual compromete la capacidad adaptativa de los sistemas frente

a eventos extremos. En este punto, la innovación tecnológica aparece como una necesidad prioritaria.

Respecto a la adaptabilidad, se evidenció una limitada apropiación de los conocimientos y tecnologías por parte de los regantes, lo que restringe su capacidad de respuesta ante cambios socioambientales (van Opstal et al., 2022). Esta falta de apropiación también afecta el atributo de equidad, especialmente por baja la participación de jóvenes y mujeres en espacios de toma de decisión, lo que limita la transición generacional y la inclusión (Elmusa, 1994; Chidiac et al., 2023).

Por último, en la dimensión de autogestión se evidenció una débil articulación institucional y deficiencias en el liderazgo y administración financiera, lo que refleja una baja autosuficiencia organizativa. Esta situación compromete la gobernanza comunitaria y dificulta la sostenibilidad a largo plazo (Cortez, 2000; González et al., 2006).

La vinculación de los indicadores con 10 ODS y 7 Principios CSA-IRA (Garcés and Padilla, 2020; FAO, 2014) refuerza el aporte estratégico de estos sistemas de riego al desarrollo sostenible. La propuesta metodológica ofrece así una herramienta operativa para evaluar e intervenir los sistemas de riego comunitarios desde una perspectiva holística, dinámica y localizada (Pérez-Serrano et al., 2021).

No obstante, existen ciertas limitaciones: la validación de los indicadores se restringe al contexto andino ecuatoriano, la aplicación de la técnica del Panel Delphi conlleva sesgos subjetivos, y la vinculación con ODS y CSA-IRA es de carácter conceptual. Estas limitaciones abren la posibilidad a futuras investigaciones para que profundicen en la validación empírica y en la adaptación del modelo en otros contextos geográficos.

5 Conclusiones

Esta investigación desarrolló una propuesta metodológica integral para evaluar la sostenibilidad de sistemas de riego comunitarios en el contexto andino ecuatoriano, mediante la definición de 31 indicadores organizados en siete atributos clave: productividad, estabilidad, confiabilidad, resiliencia

cia, adaptabilidad, equidad y autogestión. Estos indicadores se agruparon en cinco dimensiones de análisis (ambiental, social, económica, tecnológica y política), y se estructuraron considerando tres componentes del sistema: naturaleza, comunidad e infraestructura.

Los hallazgos revelan múltiples puntos críticos que afectan la sostenibilidad de estos sistemas, como la ineficiencia en el uso del agua, débil gobernanza, baja participación de grupos clave, y capacidad limitada de adaptación frente al cambio climático. Mediante el enfoque participativo de MESMIS y la técnica del Panel Delphi, se logró una caracterización contextualizada de los sistemas, permitiendo su articulación con diez ODS y siete Principios CSA-IRA.

A nivel regional, los resultados brindan una herramienta práctica para los actores comunitarios, instituciones públicas y políticas, útil para el diseño, monitoreo y evaluación de estrategias de gestión hídrica en los territorios irrigados. A nivel global, la propuesta contribuye al reporte del cumplimiento de metas internacionales de sostenibilidad, consolidando a los sistemas de riego comunitarios como actores clave en la agricultura resiliente e inclusiva. No obstante, se recomienda validar empíricamente los indicadores en otros contextos y ampliar la participación de actores en su implementación, a fin de fortalecer su aplicabilidad y alcance. Así, este estudio constituye un avance en la construcción de marcos metodológicos integradores para una gestión sostenible del agua en la agricultura y evitar presiones en ecosistemas estratégicos como los páramos.

Contribuciones de los autores

C.C.: Conceptualización, tratamiento de datos, Discusión. M.I.: Conceptualización, tratamiento de datos, Discusión. N.R.: Conceptualización, tratamiento de datos, en la relación de los indicadores con los ODS y principios IRA.

Referencias

Araral, E. (2005). Bureaucratic incentives, path dependence, and foreign aid: An empirical institutional analysis of irrigation in the philippines. *Po-*

licy Sciences, 38(2-3):131–157. Online: <https://bit.ly/4muq7N7>.

Arnés, E., Antonio, J., del Val, E., and Astier, M. (2013). Sustainability and climate variability in low-input peasant maize systems in the central Mexican highlands. *Agriculture, Ecosystems and Environment*.

Astier, M., Maser, O., and Galván-Miyoshi, Y. (2008). *Evaluación de sustentabilidad. Un enfoque dinámico y multidimensional*. SEAE / CIGA / ECOSUR / CIEco / UNAM / GIRA / Mundiprensa / Fundación Instituto de Agricultura Ecológica y Sustentable.

Brugnach, M., Craps, M., and Dewulf, A. (2017). Including indigenous peoples in climate change mitigation: addressing issues of scale, knowledge and power. *Climatic Change*.

Cachipuendo, C. (2022). The technification of irrigation as a strategy of community resilience. case study: Pisque river basin, Ecuador. In Rocha, A., López-López, P., and Salgado-Guerrero, J., editors, *Communication, Smart Technologies and Innovation for Society - Proceedings of CITIS 2021*, Smart Innovation, Systems and Technologies, pages 207–216. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH.

Cachipuendo, C., Sandoval, C., and Sandoval, J. (2024). Sentinel-2a imaging in mapping greenhouse rose production and rainwater harvesting for agricultural irrigation use. *Environmental Research Communications*, 6(11):111005. Online: <https://bit.ly/4m55qYr>.

Cachipuendo Ulcuango, C. (2021). *La Gestión Comunitaria del Agua y la Sustentabilidad de los Sistemas de Riego: Una Práctica del Buen Vivir, En Agua para la gente*, pages 139–168. Cachipuendo, C. (Coordinador). Editorial Universitaria Abya-Yala.

Cachipuendo Ulcuango, C., Castillo Izurieta, P., Cucurella Landín, L., Sánchez Proaño, R., Negrete Rodríguez, J., Ortiz-Tirado, P., Paucar Tenemaza, A., Uribe Taborda, S., and Villacís López, M. (2021). *Agua para la gente: experiencias de gestión comunitaria del agua en el Ecuador*. Editorial Universitaria Abya-Yala.

Carmona, G., Varela-Ortega, C., and Bromley, J. (2013). Participatory modelling to support deci-

- sion making in water management under uncertainty: two comparative case studies in the guadiana river basin, spain. *Journal of environmental management*.
- Chidiac, S., El Najjar, P., Ouaini, N., El Rayess, Y., and El Azzi, D. (2023). A comprehensive review of water quality indices (wqis): history, models, attempts and perspectives. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*.
- Chile, B. and Ortiz, R. (2021). Dinámica de la distribución del agua en el sistema de riego Tumbaco en Ecuador. *Siembra*, 8(2):e3074. Online: <https://bit.ly/3Hbpol9>.
- Cobo, E., Yaguache, R., Piñeiros, M., Friant, M., and Montella, R. (2018). *Aguas Compartidas, enfoques y herramientas para una mejor gestión del agua*.
- Contero, R. and Cachipueno, C. (2021). Quality of water and milk in manual milking systems in the northern sierra of Ecuador. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Peru*, 32(4):1–10. Online: <https://bit.ly/4ld7hZN>.
- Cortez, A. (2000). La autogestión de usuarios hidroagrícolas del valle de Mexicali. efectos del proceso de transferencia. *Estudios Fronterizos*, 1(2):65–91. Online: <https://bit.ly/4mdxBEM>.
- Costa, M., Xavier, A., R., F., and C., A. (2022). A composite indicator to measure sustainable water use in portugal: A compromise programming approach. *Journal of Environmental Management*.
- Darzi-Naftchali, A., Bagherian-Jeladar, M., Mashhada-Kholerdi, F., and Abdi-Moftikolaei, M. (2020). Assessing socio-environmental sustainability at the level of irrigation and drainage network. *Science of the Total Environment*.
- Elmusa, S. (1994). Towards an equitable distribution of the common palim- israeli waters: An international water law framework. *Studies in Environmental Science*.
- FAO (2014). Principles for responsible investment in agriculture and food systems. Technical report, FAO & CFS.
- Fernald, A., Tidwell, V., Rivera, J., Rodriguez, S., Guldan, S., Steele, C., Ochoa, C., Hurd, B., Ortíz, M., Boykin, K., and Cibils, A. (2012). Modeling sustainability of water, environment, livelihood, and culture in traditional irrigation communities and their linked watersheds. *Sustainability*, 4(11):2998–3022. Online: <https://bit.ly/47hPehJ>.
- Fonseca-Carreño, J., Cleves-Leguizamo, J., and León-Sicard, T. (2016). Evaluación de la sustentabilidad de agroecosistemas familiares campesinos en la microcuenca del río cormechoque (boyacá). *Ciencia y agricultura*, 13(1):29. Online: <https://bit.ly/4lc1X97>.
- Franco, J., Gaspar, P., and Mesias, F. (2012). Economic analysis of scenarios for the sustainability of extensive livestock farming in spain under the cap. *Ecological Economics*.
- Gallegos, E., Brito, C., Serrano, D., and Galárraga, R. (2018). Análisis de la variación temporal y espacial de la cobertura glaciar del nevado cayambe, ecuador, mediante fotografías aéreas e imágenes landsat. *GeoFocus. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 22(1578–5157):97–113. Online: <https://bit.ly/4IZ02G8>.
- Garcés, J. and Padilla, L. (2020). Inversión responsable en la agricultura . diagnóstico en zona afectada por conflicto armado en colombia. *Revista Sinapsis*.
- Gaybor, A. (2019). Análisis exploratorio hacia la comprensión de evolución tecnológica del riego en el ecuador. *Revista Economía*, 70(112):33–51. Online: <https://bit.ly/4mAECzg>.
- González, C., Ríos, H., Brunnet, P., Zamorano, S., and Villa, C. (2006). ¿es posible evaluar la dimensión social de la sustentabilidad?: Aplicación de una metodología en dos comunidades campesinas del valle de toluca, méxico. *Convergencia: Revista de ciencias sociales*, 13(40):107–139. Online: <https://bit.ly/3Hafb8x>.
- Guo, Y. and Yu, G. (2022). Materials innovation for global water sustainability. *ACS Materials Letters*, 4(4):713–714. Online: <https://bit.ly/3Hm6qbm>.
- Herrán, J., Sastre, S., and Torres-Tukoumidis, . (2017). Radio mensaje para la gestión del sistema de riego en comunidades rurales indígenas de ecuador. *Equidad y Desarrollo*, 28(2014):43–60. Online: <https://bit.ly/4m4pEBs>.
- Hussain, I., Turrall, H., Molden, D., and Din Ahmad, M. (2007). Measuring and enhancing the value of

- agricultural water in irrigated river basins. *Irrigation Science*, 25(3):263–282. Online: <https://bit.ly/45lLI3p>.
- Jägermeyr, J., Pastor, A., Biemans, H., and Gerten, D. (2017). Reconciling irrigated food production with environmental flows for sustainable development goals implementation. *Nature Communications*, 8(15900):1–9. Online: <https://bit.ly/41ufXny>.
- Laali, A., Hosseini, S., and Faghihi, V. (2022). Optimizing sustainability of infrastructure projects through the integration of building information modeling and envision rating system at the design stage. *Sustainable Cities and Society*.
- Llambí, L., Soto, W., Célleri, R., De Bievre, B., Ochoa, B., and Borja, P. (2012). *Ecología, Hidrología y Suelos de Páramos. Proyecto Páramo Andino*. Condensan. Online: <https://bit.ly/4m3BfRc>.
- Masera, O., Astier, M., and López-Riduara, S. (2000). *Sustentabilidad y manejo de recursos naturales: el marco de evaluación MESMIS*. Mundi-Prensa.
- Mazabel, D. and Caldera, A. (2018). Self-sustaining, irrigated agriculture and sustainability. a study in southern guanajuato, mexico. *International Journal of Research in Sociology and Anthropology*, 4(1):24–35. Online: <https://bit.ly/41wYBXb>.
- Meng, Y., Wang, M., Xu, W., Guan, X., and Yan, D. (2022). Structure construction, evolution analysis and sustainability evaluation of water-ecological-economic system. *Sustainable Cities and Society*, 83:103966. Online: <https://bit.ly/4oh1sXg>.
- Morris, J. (2019). Developing and exploring indicators of water sustainable development. *Heliyon*, 5(5):e01778. Online: <https://bit.ly/4opszX9>.
- Nagrah, A., Chaudhry, A., and Giordano, M. (2016). Collective action in decentralized irrigation systems: Evidence from pakistan. *World Development*.
- Newman, R., Ashley, R., Molyneux-Hodgson, S., and Cashman, A. (2011). Managing water as a socio-technical system: the shift from ‘experts’ to ‘alliances’. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Engineering Sustainability*, 164(1):95–102. Online: <https://bit.ly/4ovmZTa>.
- Persson, A., Weitz, N., and Nilsson, M. (2016). Follow-up and review of the sustainable development goals: Alignment vs. internalization. *Review of European, Comparative & International Environmental Law*, 25(1):59–68. Online: <https://bit.ly/4lZT1VD>.
- Perugachi, J. and Cachipueno, C. (2000). *La lucha por el agua. Gestión Comunitaria del Proyecto de Agua Potable Pesillo-Imbabura*. Editorial Abya-Yala. Online: <https://bit.ly/3J30xAx>.
- Playan, E. (1994). Geórgica. *Review of European, Comparative & International Environmental Law*, 3.
- Pérez-Serrano, D., Cabirol, N., Martínez-Cervantes, C., and Rojas-Oropeza, M. (2021). Mesquite management in the mezquital valley: A sustainability assessment based on the view point of the hñāhñú indigenous community. *Environmental and Sustainability Indicators*, 10:100113. Online: <https://bit.ly/47lkWL3>.
- Ríos, J., Torres, M., Ruiz, J., and Torres, M. (2016). Eficiencia y productividad del agua de riego en trigo (*Triticum vulgare*) de ensenada y valle de Mexicali, Baja California, México. *Acta Universitaria*, 26(1):20–29. Online: <https://bit.ly/4m2IXel>.
- Samian, M., Mahdei, K., Saadi, H., and Movahedi, R. (2015). Identifying factors affecting optimal management of agricultural water. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 14(1):11–18. Online: <https://bit.ly/41oE9YA>.
- Sarandón, S. (2010). *Agroecología. El Camino hacia una agricultura sustentable*, chapter El desarrollo y uso de indicadores para evaluar la sustentabilidad de los agroecosistemas, page 393–414.
- Shalsi, S., Ordens, C., Curtis, A., and Simmons, C. (2022). Coming together: Insights from an Australian example of collective action to co-manage groundwater. *Journal of Hydrology*, 608:127658. Online: <https://bit.ly/45BHDcJ>.
- Stephens, P. (2013). The principles of responsible agricultural investment. *Globalizations*, 10(1):187–192. Online: <https://bit.ly/45FRE8L>.
- Talukder, B., Blay-Palmer, A., van Loon, G., and Hipel, K. (2020). Towards complexity of agricultural sustainability assessment: Main issues and concerns. *Environmental and Sustainability Indicators*, 6:100038. Online: <https://bit.ly/4lk1WAe>.

- Tácuna, R., Aguirre, L., and Flores, E. (2015). Influencia de la revegetación con especies nativas y la incorporación de materia orgánica en la recuperación de pastizales degradados. *Ecología Aplicada*, 14(1-2):191. Online:https://bit.ly/4lIVSHt.
- Tongo, E. and Soplín, H. (2022). Evaluación de la sostenibilidad de los sistemas de producción pecuaria en la provincia de oxapampa / pasco / Perú. *Ecología Aplicada*, 21(1):67–75. Online:https://bit.ly/4lIWwVp.
- Turner, B., Tidwell, V., Fernald, A., Rivera, J., Rodríguez, S., Guldán, S., Ochoa, C., Hurd, B., Boykin, K., and Cibils, A. (2016). Modeling acequia irrigation systems using system dynamics: Model development, evaluation, and sensitivity analyses to investigate effects of socio-economic and biophysical feedbacks. *Sustainability*, 8(10):1019. Online:https://bit.ly/4fxWE2Q.
- United Nations (2015). Transformar nuestro mundo: la agenda 2030 para el desarrollo sostenible. techreport, New York. Asamblea General de las Naciones Unidas.
- Valdez, C., Guzmán, M., Valdés, A., Forougbakhch, R., Alvarado, M. A., and Rocha, A. (2018). Structure and diversity of pristine scrubland vegetation from tamaulipas, Mexico. *Revista De Biología Tropical*, 66(4):1674–1682. Online:https://bit.ly/45umqAp.
- Vallejo, F., Salazar, M., Nieto, L., and Giraldo, R. (2020). Sustainability of agroecosystems in a Rural Reserve Area of Pradera, Valle del Cauca, Colombia. *Environmental and Sustainability Indicators*, 7:100040. Online:https://bit.ly/4fxHASO.
- van Opstal, J., Neale, C., and Hipps, L. (2022). Evaluating the adaptability of an irrigation district to seasonal water availability using a decade of remotely sensed evapotranspiration estimates. *Agricultural Water Management*, 261:107383. Online:https://bit.ly/45t1aeg.
- Velasco-Muñoz, J., Aznar-Sánchez, J., Belmonte-Ureña, L., and Sánchez, R. (2018). Sustainable water use in agriculture: A review of worldwide research. *Sustainability*, 10(4):1–18. Online:https://bit.ly/3J60XGc.
- Wang, Y. and Wu, J. (2018). An empirical examination on the role of water user associations for irrigation management in rural China. *Water Resources Research*, 54(12):9791–9811. Online:https://bit.ly/4osrfCQ.
- Ward, F. (2022). Enhancing climate resilience of irrigated agriculture: A review. *Journal of Environmental Management*, 302(PA):114032. Online:https://bit.ly/46OCYW4.



ESTUDIO DE LA EFICACIA DE LOS EXTRACTOS DE PLANTAS Y AGENTES BACTERICIDAS APLICADOS CONTRA *XANTHOMONAS AXONOPODIS*, EL AGENTE CAUSANTE DEL TIZÓN DEL FRIJOL

SCRUTINIZING THE EFFICACY OF PLANT EXTRACTS AND BACTERICIDAL AGENTS APPLIED AGAINST *XANTHOMONAS AXONOPODIS*, THE CAUSATIVE AGENT OF BEAN BLIGHT

Elias Mjaika Ndifon* 

Alex Ekwueme Federal University Ndufu-Alike, Faculty of Agriculture, Department of Crop Science, PMB 1010 Abakaliki, Nigeria. [<https://ror.org/04thacr56>]

*Autor para correspondencia: emndi4nn@yahoo.com

Manuscrito recibido el 17 de enero de 2025. Aceptado, tras revisión el 30 de abril de 2025. Publicado el 1 de septiembre de 2025.

Resumen

El frijol común (un cultivo básico de semilla y una leguminosa importante) es susceptible al tizón del frijol (*Xanthomonas axonopodis*). El estudio controló el tizón del frijol en el laboratorio y en el invernadero utilizando productos botánicos y bactericidas. Se utilizó un diseño completamente aleatorizado y replicado y se registró el porcentaje de germinación, el número de hojas, la longitud del brote, el peso de la semilla, el peso fresco del brote, la incidencia de la enfermedad y la severidad. Por medio del *in vitro*, el control del patógeno dependió de la aplicación de antibióticos: tetraciclina, cefalosporina, lincomicina y eritromicina en orden de eficacia, dando un 52,2–100% de inhibición del patógeno. Los extractos acuosos *in vitro* de *Eucalyptus globulus*, *Aframomum melegueta*, *Ricinus communis* y *Acmella oleracea* inhibieron eficazmente el 25,0–62,5% del crecimiento bacteriano. En el invernadero, los efectos de los bactericidas químicos en las especies de *Xanthomonas* revelaron una diferencia significativa en el número de hojas a los 49 días después de la inoculación (DDI). También la inhibición porcentual de las especies de *Xanthomonas* por los bactericidas osciló entre el 46,2% y el 97,5% entre los 6 y los 56 DDI. La longitud de los brotes fue significativamente diferente bajo la influencia de los extractos vegetales a los 35 y 49 DDI. Los extractos vegetales causaron una inhibición porcentual del patógeno del 36,4% al 90,9% entre los 6 y los 56 DDI. Se requiere la formulación de aplicaciones agrícolas utilizando estos agentes de control.

Palabras clave: Bactericidas, tizón común del frijol, proteína vegetal, *Xanthomonas campestris*, *Xanthomonas phaseoli*.

Abstract

Common bean (a major staple seed crop and legume) is susceptible to bean blight (*Xanthomonas axonopodis*). The study controlled bean blight in the laboratory and screen-house using botanicals and bactericides. Completely randomized and replicated design was used and recorded percentage germination, number of leaves, shoot length, seed weight, shoot fresh weight, disease incidence, and severity. *In vitro*, control of the pathogen depended on the application of antibiotics: tetracycline, cephalosporin, lincomycin, and erythromycin in order of efficacy, giving 52.2–100% inhibition of the pathogen. *In vitro*, aqueous extracts of *Eucalyptus globulus*, *Aframomum melegueta*, *Ricinus communis*, and *Acemilla oleracea* effectively inhibited 25.0–62.5% of the bacterial growth. In screen-house, effects of chemical bactericides on *Xanthomonas* species revealed a significant difference in the number of leaves at 49 days after inoculation (DAI). Also, percentage inhibition of *Xanthomonas* species by the bactericides ranged from 46.2-97.5% from 6-56 DAI. Shoot lengths were significantly different under the influence of plant extracts at 35 DAI and 49 DAI. Plant extracts caused 36.4-90.9% percentage inhibition of the pathogen from 6-56 DAI. Formulation of agricultural applications using these control agents is required.

Keywords: Bactericides, common bean blight, plant protein, *Xanthomonas campestris*, *Xanthomonas phaseoli*.

Forma sugerida de citar: Ndifon, E. Mjaika (2025). Estudio de la eficacia de los extractos de plantas y agentes bactericidas aplicados contra *Xanthomonas axonopodis*, el agente causante del tizón del frijol. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*. Vol. 42(2):61-77. <https://doi.org/10.17163/lgr.n42.2025.04>.

IDs Orcid:

Elias Mjaika Ndifon: <https://orcid.org/0000-0001-6027-4714>

1 Introducción

El frijol común (*Phaseolus vulgaris* L., Fabaceae) es una de las leguminosas más importantes a nivel mundial. Sus formas cultivadas incluyen el frijol francés, frijol blanco, frijol para ensalada, frijol tierno, frijol de vaina y frijol rojo. Entre 2019 y 2022, la producción de frijol común seco alcanzó aproximadamente los 28 millones de toneladas (Kadege et al., 2022; FAOSTAT, 2024). La FAO (1999) y Porch et al. (2013) reportaron que el valor de mercado del frijol supera al de todas las demás especies de leguminosas. Aunque los datos de rendimiento siguen siendo inconsistentes en África, el continente representa aproximadamente 7,8 millones de hectáreas -es decir, cerca del 25%- del área global cultivada con frijol.

El frijol constituye un alimento básico para millones de hogares en África. En África subsahariana -particularmente en países del este como Etiopía, Kenia, Burundi, Tanzania y Uganda-, así como en África occidental, especialmente en Nigeria, el frijol representa una fuente importante de ingresos y seguridad alimentaria (Howard et al., 2005; CABI, 2022; FAO, 1999; Kadege et al., 2022). El frijol se cultiva en todo el mundo no solo por sus semillas y vainas comestibles, sino también por sus hojas y rastrojo, que se utilizan como forraje.

Desde el punto de vista nutricional, el frijol es rico en fibra dietética, proteínas, y vitaminas esenciales (por ejemplo, las vitaminas A y C) y minerales clave como hierro, zinc, cobre, potasio, calcio y magnesio, que aportan entre un 8 y 10% de proteínas por cada 100 g de consumo diario y es especialmente rico en aminoácidos esenciales, particularmente en lisina y triptófano, aunque presenta deficiencia de metionina. Además, contiene niveles mínimos de grasa y cantidades insignificantes de colesterol nocivo (CABI, 2022; Cámara et al., 2013; Chen et al., 2021).

Cámara et al. (2013) y Kadege et al. (2022) han clasificado al frijol como un alimento funcional debido a sus efectos beneficiosos sobre la salud humana. Esto se atribuye a su elevado contenido de compuestos fenólicos, almidones complejos, vitaminas y fructooligosacáridos, que contribuyen a la prevención y manejo de enfermedades cardiovasculares, diabetes y diversos tipos de cáncer. El frijol

puede conservarse mediante secado, cocción y enlatado, o bien ser procesado en forma de harinas alternativas libres de gluten.

No obstante, la producción de frijol se ve limitada por diversos factores, entre ellos las enfermedades, plagas de insectos, baja fertilidad del suelo (especialmente deficiencia de fósforo), estrés abiótico como la sequía, escasa adaptabilidad de las variedades introducidas, acceso restringido a insumos agrícolas y prácticas de manejo subóptimas (Kamani et al., 2005; Akibode and Maredia, 2011; Porch et al., 2013; Beebe et al., 2014; OECD, 2016; Mondo et al., 2019; Kadege et al., 2022).

La escaldadura bacteriana común -causada por *Xanthomonas axonopodis* pv. *phaseoli* (familia Lysobacteraceae/Xanthomonadaceae)- se encuentra entre las cinco enfermedades bacterianas más severas que afectan al frijol. Este patógeno infecta el follaje, las vainas, las semillas y los tallos (ISTA, 2007; Muedi and Fourie, 2014; Chen et al., 2021). Según Karavina et al. (2011) y Manju et al. (2024), la severidad de la enfermedad alcanza su punto máximo a temperaturas entre 25 °C y 35 °C, especialmente bajo condiciones de alta pluviosidad y humedad relativa. Estos estudios estiman pérdidas de rendimiento de hasta un 40% bajo dichas condiciones.

Dada la magnitud de las pérdidas de rendimiento asociadas a esta enfermedad, los investigadores han aumentado los esfuerzos para desarrollar estrategias de manejo sostenibles. Chen et al. (2021) señalaron la escasez de opciones eficaces de control químico o biológico para enfermedades bacterianas, lo que limita a los agricultores al uso de prácticas culturales. Sin embargo, confirmaron la eficacia de fungicidas a base de cobre con propiedades bactericidas, estreptomycin, kasugamicina y fertilizantes foliares a base de manganeso en el control de infecciones bacterianas.

Karavina et al. (2011) y Muedi and Fourie (2014) destacaron la efectividad de los bactericidas a base de cobre -incluidos el oxocloruro de cobre, óxido de cobre, sulfato de cobre e hidróxido de cobre-, así como del dietilditiocarbamato de potasio, en el manejo de infecciones foliares bacterianas. Asimismo, los compuestos derivados de plantas como los aceites esenciales muestran un potencial para el control de

la escaldadura bacteriana. Aunque los antibióticos sintéticos como la estreptomycin y la kasugamicina pueden actuar exitosamente sobre patógenos externos, hasta el momento no se ha logrado erradicar *X. axonopodis* del interior de semillas infectadas.

Cámara et al. (2013) y Poch et al. (2013) han mencionado la escasa representación de investigaciones sobre el frijol común, particularmente en África, lo cual contribuye a los bajos rendimientos en la región a pesar de la importancia económica y nutricional del cultivo. En este contexto, el presente estudio evalúa rigurosamente la eficacia antimicrobiana de extractos vegetales seleccionados y compuestos bactericidas frente a *X. axonopodis*, con el objetivo de proponer soluciones de manejo rentables y ecológicamente sostenibles.

2 Materiales y Métodos

2.1 Área de estudio

Este estudio se llevó a cabo en Nigeria, en la Universidad Federal Alex Ekwueme Ndufu-Alike, Abakaliki (6.069°N, 8.199°E). Las leguminosas como el frijol caupí, frijol común, frijol gandul, maní bambara, soya, frijol mungo, frijol espada, entre otras, se cultivan ampliamente en todas las zonas agroecológicas de África Occidental, incluida Nigeria.

Sin embargo, los rendimientos del frijol en la región suelen estar por debajo del promedio mundial debido a diversas limitaciones en la producción, entre las cuales destacan las plagas y enfermedades. Las condiciones ecológicas necesarias para el cultivo de frijol son similares a las requeridas por *Xanthomonas axonopodis* (Figura 1). Esto constituye un problema para el manejo de este patógeno.

2.2 Preparación de los extractos vegetales

Los órganos vegetales (como las semillas de *Ricinus communis*, flores de *Acmella oleracea*, resina de *Eucalyptus globulus* y semillas de *Aframomum melegueta*) utilizados para el control del tizón bacteriano del frijol se recolectaron en Abakaliki y sus alrededores. Estos materiales vegetales se lavaron con agua corriente y posteriormente se esterilizaron superficialmente con hipoclorito de sodio al 1% durante 5 minutos. Luego, se maceraron hasta obtener una pasta o polvo utilizando un mortero y una maja. Cada extracto contenía 165 g de tejido vegetal por litro de agua destilada estéril y se sometió a extracción durante 24 horas. Las plantas utilizadas fueron: ricino (*Ricinus communis*), planta del dolor de muelas (*Acmella oleracea*), eucalipto azul (*Eucalyptus globulus*) y pimienta de Guinea o grano del paraíso (*Aframomum melegueta*).

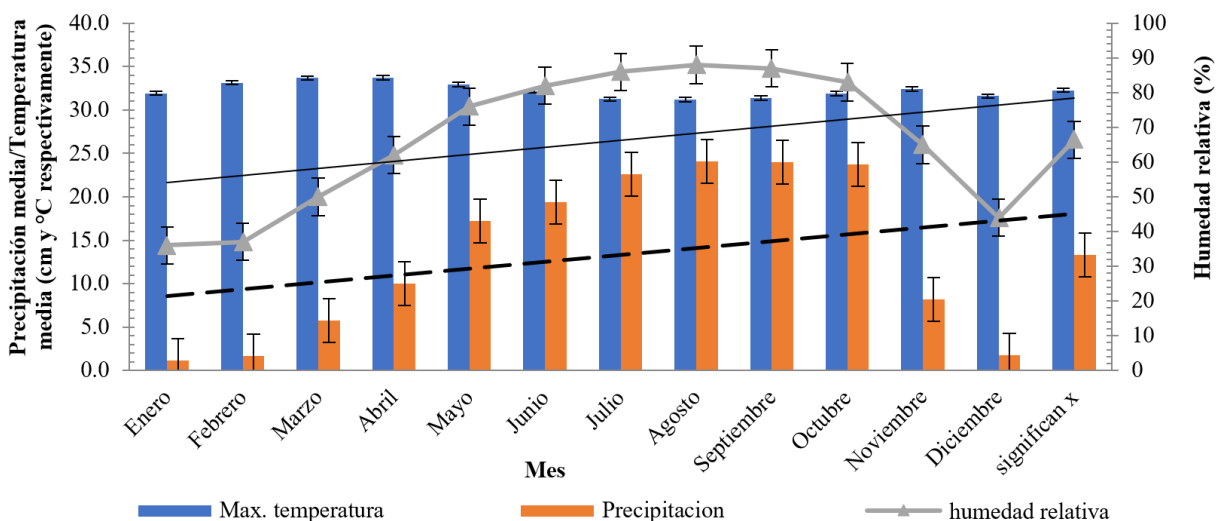


Figura 1. Patrones típicos de temperatura, humedad relativa y precipitación en los sitios de estudio en Abakaliki, estado de Ebonyi. Figura adaptada de Ndifon (2022).

2.3 Preparación de los extractos vegetales

Las semillas y brotes de frijol rojo utilizados para el ensayo se obtuvieron inicialmente de Jos (en el estado de Plateau), Nigeria. Los órganos de la planta se desinfectaron superficialmente mediante hipoclorito de sodio al 1% durante dos minutos, y posteriormente se enjuagaron con agua destilada estéril. Para el aislamiento del patógeno se empleó agar nutritivo autoclavado, enriquecido con flucanazol que contenía glucosa (1 g por litro), según el protocolo (Kado and Heskett, 1970). Se colocaron asépticamente tres semillas por caja de Petri sobre el medio de cultivo.

Las placas se incubaron a $28\pm 2^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas. Los crecimientos bacterianos observados fueron subcultivados individualmente y examinados para verificar la similitud entre las colonias. Afortunadamente, solo se aisló un tipo de colonia bacteriana a partir de los tejidos del frijol. El subcultivo se continuó con el objetivo de purificar el aislamiento. El patógeno se conservó a 4°C y se utilizó posteriormente para su caracterización morfológica y bioquímica (Sinclair and Dhingra, 1995; Grimault et al., 2024).

2.4 Recuento microbiano total

Se realizó una dilución seriada hasta 1×10^6 del homogeneizado en tubos de ensayo estériles mediante el método de suspensión directa (Ordóñez et al., 2023). Se puso en un pipete un mililitro de la muestra de frijol diluida en cada caja de Petri marcada en serie.

Se utilizó agar nutritivo para el recuento total. Para el cultivo bacteriano se empleó el método de estriado en placa. La esterilización por autoclave se realizó a 120°C , 15 psi durante 15 minutos. Al finalizar la incubación, se contaron las colonias y se calcularon las unidades formadoras de colonias (UFC) por mililitro de suspensión. Este procedimiento permitió obtener una estimación precisa del recuento viable de UFC bacterianas.

2.5 Caracterización e identificación de los aislamientos bacterianos

Para la caracterización e identificación del patógeno se recurrió a pruebas fenotípicas y bioquímicas (IS-

TA, 2007; Rajyalakshmi et al., 2016; Ordóñez et al., 2023; Grimault et al., 2024). Se recomienda emplear una combinación de pruebas para lograr una identificación más precisa. En este estudio se utilizaron opciones tanto fenotípicas como bioquímicas para la identificación del patógeno.

2.5.1 Tinción de Gram de los aislamientos bacterianos

Se extendió una colonia bacteriana sobre un portaobjetos limpio y se flameó brevemente sobre un mechero de Benson. Se añadió solución acuosa de cristal violeta al 0,5% sobre la zona extendida durante 30 segundos y luego se lavó con agua durante un minuto. Posteriormente, se aplicó solución de yodo de Gram durante un minuto y se enjuagó con un frasco lavador. Se procedió a una decoloración rápida con etanol al 95%.

La preparación se tintó con safranina durante 10 segundos, se enjuagó nuevamente con el frasco lavador, se secó y se observó en el microscopio para evaluar la presencia de tinción bacteriana (Rajyalakshmi et al., 2016; Ordóñez et al., 2023).

2.5.2 Prueba de motilidad de los aislamientos bacterianos

La prueba se llevó a cabo utilizando un caldo nutritivo + glucosa que actúa como medio semisólido. Este medio se preparó siguiendo las instrucciones del fabricante. El caldo se vertió en tubos de ensayo y se inoculó mediante la técnica de punción vertical con crecimiento bacteriano joven (cultivado durante 24 horas). La incubación se realizó a $28\pm 2^{\circ}\text{C}$. Se examinaron los tubos para observar el crecimiento y signos de motilidad. Si las bacterias son móviles, el crecimiento se dispersa lateralmente en el medio con el paso del tiempo tras la inoculación por punción.

2.5.3 Caracterización morfológica de los aislamientos bacterianos

Las bacterias se sembraron por estriado sobre el medio respectivo y se incubaron a $28\pm 2^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas. Al finalizar la incubación, se evaluaron las colonias en cuanto a las características morfológicas y culturales, incluyendo el tipo de margen, naturaleza de la superficie, textura, elevación, forma, color y grado de transparencia o translucidez de la co-

lonia (Wogu and Ofuase, 2014; Rajyalakshmi et al., 2016).

2.5.4 Caracterización bioquímica de los aislamientos bacterianos

El aislamiento bacteriano se identificó mediante las siguientes pruebas bioquímicas: utilización de carbohidratos (empleando glucosa), catalasa, ureasa, esculina, consumo de oxígeno, producción de sulfuro de hidrógeno, hidrólisis de almidón, reducción de nitratos, oxidasa, prueba de KOH y ureasa (Saddler and Bradbury, 2005; Porch et al., 2013; Wogu and Ofuase, 2014; Rajyalakshmi et al., 2016; Grimault et al., 2024).

Las características morfológicas y bioquímicas del aislamiento revelaron que el patógeno corresponde a *X. axonopodis* (asociado al patovar *phaseoli* de acuerdo con la literatura especializada, manuales, resultados de patogenicidad y en contraste con otros agentes bacterianos probables en frijol) (Tabla 1). Se realizaron pruebas de patogenicidad *in vivo* con estos aislamientos, demostrando que el frijol rojo presenta alta susceptibilidad (Grimault et al., 2024).

2.6 Preparación de la cepa bacteriana utilizada en los ensayos *in vitro* e *in vivo*

La escaldadura bacteriana del frijol o escaldadura común del frijol es causada por *Xanthomonas axonopodis* pv. *phaseoli* (Smith) Vauterin et al. (sinónimos: *Xanthomonas campestris* pv. *phaseoli* (Smith) Dye; o *Xanthomonas phaseoli* pv. *fuscans* (Burkholder) Starr & Burkholder).

Se incubaron las placas en agar nutritivo a $28 \pm 2^\circ\text{C}$ durante 24 horas. Se realizó una dilución seriada hasta 1×10^6 del cultivo homogeneizado en tubos de ensayo estériles. Se utilizó el estándar 0,5 de McFarland para preparar densidades de inóculo de $1,0 \times 10^6$ UFC mL^{-1} mediante el método de suspensión directa en agua salina (con NaCl a $8,5 \text{ g L}^{-1}$) (Wogu and Ofuase, 2014; Ordóñez et al., 2023; Grimault et al., 2024).

2.7 Ensayos *in vitro*

2.7.1 Evaluación de bactericidas contra *X. axonopodis*

Se evaluaron *in vitro* los patrones de resistencia a antibióticos y la actividad antimicrobiana de los aislamientos bacterianos mediante el uso de bactericidas químicos. Los antibióticos empleados incluyeron eritromicina, tetraciclina, cefalosporina y lincomicina (todos a una concentración de 500 mg de las formulaciones comerciales por litro) (Wogu and Ofuase, 2014; Rajyalakshmi et al., 2016; Ordóñez et al., 2023). Se incluyó un control negativo utilizando únicamente agua destilada estéril como placebo.

Se utilizó agar nutritivo enriquecido con dextrosa para esta prueba. La superficie del agar se cubrió completamente con el agente antibiótico empleando la técnica de extensión en placa. Las concentraciones utilizadas fueron del 0%, 50% y 100%. Se utilizó un sacabocados de 6 mm de diámetro para realizar aseptícamente un orificio en el centro del agar, al cual se aplicaron 50 μL de la suspensión de *X. axonopodis*.

El antibiótico se difundió en el agar inhibiendo el crecimiento del patógeno. La incubación se realizó a $28 \pm 2^\circ\text{C}$ durante 24 horas. Se observaron las placas en busca de zonas de inhibición; el diámetro (mm) se midió y registró utilizando un calibrador (Saddler and Bradbury, 2005; Mounyr et al., 2016).

2.7.2 Evaluación de extractos vegetales contra *X. axonopodis*

También se evaluaron *in vitro* la resistencia a antibióticos y la actividad antimicrobiana de los aislamientos bacterianos utilizando extractos vegetales. Los extractos evaluados incluyeron *Eucalyptus globulus*, *Acmella oleracea*, *Aframomum melegueta* y *Ricinus communis*. Se incluyó un control negativo entre los tratamientos, el cual fue inoculado con el patógeno sin aplicar ningún agente inhibidor, mostrando por tanto los efectos completos de la infección.

Se utilizó agar nutritivo con fluconazol como medio de cultivo. La prueba se replicó tres veces. Se inoculó toda la superficie del agar utilizando la técnica de extensión en placa con 50 μL de la sus-

pensión de *X. axonopodis* preparada previamente. Se realizó un orificio central aséptico en el agar usando un sacabocados de 6 mm de diámetro, donde se aplicaron 100 μ L del extracto vegetal.

El extracto se difundió en el agar e inhibió el crecimiento del patógeno. Las placas se incubaron a $28\pm 2^\circ\text{C}$ durante 24 horas. Se observaron zonas de inhibición y se midió el diámetro del crecimiento (mm) utilizando un calibrador, registrando los datos correspondientes.

2.8 Ensayos *in vivo*

Ensayo 1: Efecto de los extractos vegetales sobre la escaldadura del frijol rojo: consecuencias en el crecimiento y rendimiento de plantas de frijol bajo invernadero

Los extractos vegetales (preparados previamente) se aplicaron a concentraciones de 0,0%, 50% y 100%, preparadas mediante diluciones en progresión aritmética. El ensayo *in vitro* bajo diseño completamente al azar (DCA) incluyó nueve tratamientos: un control, *A. oleracea* (50% y 100%), *E. globulus* (50% y 100%) y *R. communis* (50% y 100%). Las plantas se cultivaron durante 90 días antes de la finalización del ensayo.

Ensayo 2: Efecto de bactericidas sobre *X. axonopodis* en frijol rojo: consecuencias en el crecimiento y rendimiento de plantas de frijol bajo invernadero

El experimento en macetas, bajo diseño completamente al azar (DCA) y con tres repeticiones, inclu-

yó los siguientes tratamientos: un control negativo, tetraciclina (0%, 50% y 100%), lincomicina (0%, 50% y 100%) y cefalosporina (0%, 50% y 100%). Las plantas se cultivaron durante 90 días antes de concluir el ensayo. Cada fungicida se preparó a una concentración de 500 mg L⁻¹ a partir de formulaciones comerciales.

2.9 Recolección y análisis de datos

El porcentaje de germinación se calculó dividiendo el número total de semillas germinadas entre el número total de semillas sembradas por parcela, multiplicado por 100%. El vigor de las plántulas se determinó utilizando una escala (Ndifon, 2023). Se evaluó la severidad de la enfermedad utilizando la escala presentada en la Tabla 1.

El porcentaje de inhibición del patógeno se calculó utilizando la ecuación 1.

$$PI = \left(\frac{C - T}{C} \right) * 100\% \quad (1)$$

Donde, *PI* es el porcentaje de inhibición del crecimiento del patógeno. *C* es el radio cubierto por el patógeno en el control negativo. Y *T* es el radio cubierto por el patógeno en la placa tratada.

Tabla 1. Escala de severidad de la enfermedad.

Clasificación	Gravedad %	Descripción de la gravedad en brotes/hojas
0	0,0-0,99 %	Sin lesiones, buen color de las hojas y plantas vigorosas
1	1-3,0 %	Síntomas visibles difíciles de discernir
2	3,1-10 %	Algunas lesiones de tizón en la planta
3	10,1-20 %	Ligeramente más lesiones de tizón que en 1
4	20,1-30 %	Pequeñas lesiones de tizón con esporulación limitada
5	30,1-40 %	Plantas con pocas superficies grandes de tizón y esporulación
6	40,1-50 %	Abundante y generalmente grandes superficies de tizón con esporulación
7	50,1-60 %	Plantas con lesiones grandes, tejido clorótico y necrótico
8	60,1-70 %	Esporulación y lesiones coalescentes muy discernibles
9	70,1-80 %	Gran esporulación, lesiones coalescentes y pocas hojas caídas Hojas
10	80,1-90 %	Caída de hojas muy desenfrenada, gran esporulación y lesiones coalescentes
11	90,1-100 %	Caída de hojas más alta, hojas caídas, plantas muertas

Los datos recolectados incluyeron: porcentaje de germinación, vigor de las plántulas, número de hojas, longitud del brote, diámetro del tallo, número de ramas, peso de semillas, peso fresco del brote, número de vainas, incidencia y severidad de la escaldadura. Se registró la incidencia de la escaldadura dividiendo el número de plantas infectadas entre el número total de plantas en el tratamiento evaluado, multiplicado por 100%.

Los datos se sometieron a un análisis de varianza (ANOVA), y las medias se compararon mediante la prueba de rangos múltiples de Duncan (DMRT) con un nivel de significancia de $p \leq 0,05$.

3 Resultados y Discusión

Los resultados de la caracterización fenotípica y de las pruebas bioquímicas realizadas sobre la bacteria se presentan en la Tabla 2. Estas pruebas, junto con la evidencia reportada en la literatura científica (Schaad et al., 2001; Lacy and Lukezic, 2004; Saddler and Bradbury, 2005; ISTA, 2007; Wogu and Ofuase, 2014; Rajyalakshmi et al., 2016; Ordóñez et al., 2023; Grimault et al., 2024), permitieron confirmar la identidad del microorganismo *Xanthomonas axo-*

nopodis.

El control del patógeno *in vitro* mediante el uso de bactericidas se ejecutó exitosamente y sus resultados se muestran en la Figura 2.

La eficacia de la tetraciclina (a concentraciones del 50% y 100%) fue significativamente superior al resto de los tratamientos (Tabla 3). Los demás tratamientos —eritromicina al 50%, lincomicina y cefalosporina (cada uno al 50% y 100%)— también presentaron una eficacia superior al control. Los bactericidas lograron una excelente inhibición del crecimiento bacteriano, con porcentajes de inhibición comprendidos entre el 52,2% y el 100%, según el tamaño de la zona de inhibición observada.

Los extractos vegetales también controlaron eficazmente a *X. axonopodis in vitro*, generando una reducción del crecimiento radial (Tabla 3). Estos extractos produjeron un rango de inhibición del patógeno entre el 28,8% y el 62,5%. Los tratamientos más eficaces fueron *Eucalyptus globulus* al 100%, *Aframomum melegueta* al 100%, *Ricinus communis* al 100% y al 50%, seguidos de *Acmella oleracea* al 100%, todos ellos con una acción destacada contra *X. axonopodis in vitro*.

Tabla 2. Caracterización de la cepa bacteriana utilizada.

Caracterización de la cepa bacteriana utilizada											
Características morfológicas	Tinción de Gram	Motilidad	Borde de la colonia	Superficie	Textura	Elevación	Forma de la colonia	Color	Transparencia		
características	-	+	Entero	Brillante	Lisa	Elevada	Circular, convexa, irregular	Anaranjado-amarillo	-		
Características bioquímicas	Utilización de glucosa (carbohidrato)	Catalasa	Producción de sulfuro de hidrógeno (H_2S)	Hidrólisis del almidón	Oxidasa	Prueba de KOH	Fermentación en medio Oxi-Fem	Hidrólisis de esculina	Aeróbico / oxígeno	Reducción de nitratos	Ureasa
rasgos*	+	+	+	+	-	+	-	+	+	-	-

*Los rasgos pueden ser positivos (+) o negativos (-). El símbolo + o - indica el tipo de respuesta del organismo frente al agente utilizado. Las respuestas esperadas se indican con +, mientras que la ausencia de respuesta esperada se indica con -.

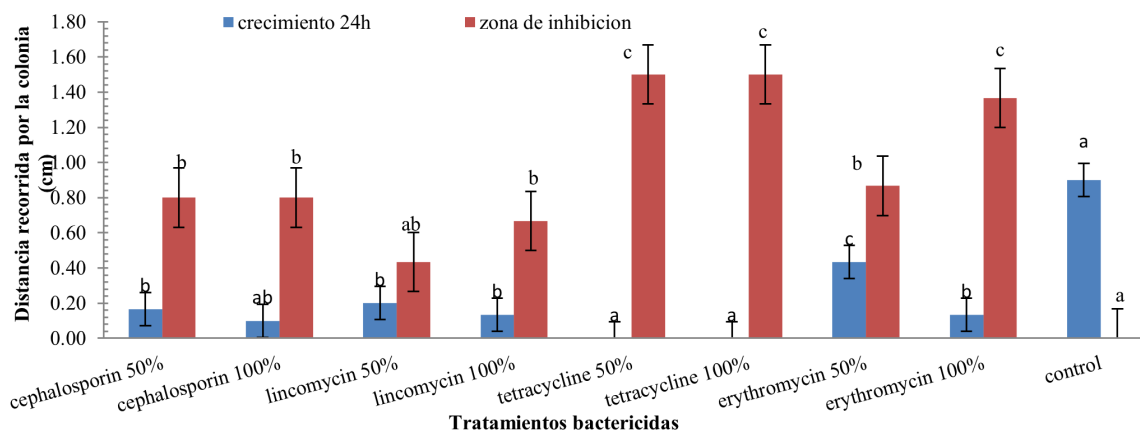


Figura 2. Efecto de los bactericidas sintéticos sobre *X. axonopodis* *in vitro*.

Los promedios acompañados por la(s) misma(s) letra(s) no difieren significativamente entre sí según la prueba de rangos múltiples de Duncan (DMRT) con un nivel de significancia de $p \leq 0,05$.

Tabla 3. Inhibición del crecimiento de *X. axonopodis* por bactericidas vegetales y químicos seleccionados *in vitro*.

Bactericidas químicos	% de inhibición
Cefalosporina 50 %	81,1
Cefalosporina 100 %	88,9
Lincomicina 50 %	77,8
Lincomicina 100 %	85,6
Tetraciclina 50 %	100,0
Tetraciclina 100 %	100,0
Eritromicina 50 %	52,2
Eritromicina 100 %	85,6
Extractos vegetales	% de inhibición
<i>Aframomum melegueta</i> 100 %	53,8
<i>Aframomum melegueta</i> 50 %	28,8
<i>Eucalyptus globulus</i> 100 %	62,5
<i>Eucalyptus globulus</i> 50 %	33,8
<i>Acmella oleracea</i> 100 %	46,3
<i>Acmella oleracea</i> 50 %	33,6
<i>Ricinus communis</i> 100 %	53,8
<i>Ricinus communis</i> 50 %	50,1

Mientras tanto, el control del patógeno *in vitro* mediante extractos vegetales también fue exitoso y se presenta en la Figura 3. La zona de inhibición fue registrada 48 horas después de la inoculación. Se observó que *Eucalyptus globulus* al 100% generó la mayor zona de inhibición, seguido por *Acmella oleracea* (100%), luego *Aframomum melegueta* (100%) y *Eucalyptus* sp. al 50%, antes que *A. melegueta* al 50%.

Los efectos de los bactericidas químicos sobre

las especies de *Xanthomonas* revelaron diferencias significativas en el número de hojas entre los tratamientos a los 49 días después de la inoculación (DAI), como se muestra en la Figura 4. No se encontraron diferencias significativas en la longitud de los brotes. El porcentaje de inhibición de *Xanthomonas* por los bactericidas osciló entre el 46,2% y el 97,5% a lo largo del tiempo, siendo más alto al inicio del ensayo (20 DAI) para todos los químicos, con una disminución progresiva con el tiempo.

Los extractos vegetales no causaron diferencias significativas entre los tratamientos en cuanto al número de hojas en invernadero (Figura 5). No obstante, la longitud de los brotes sí presentó diferencias significativas bajo la influencia de los extractos vegetales a los 35 y 49 DAI, aunque estas diferencias

no fueron consistentes en el tiempo. El porcentaje de inhibición del patógeno varió entre 36,4% y 90,9%, destacándose *E. globulus* al 50% y 100% como los tratamientos más eficaces, seguido de *R. communis* al 100% y *A. oleracea* al 50%.

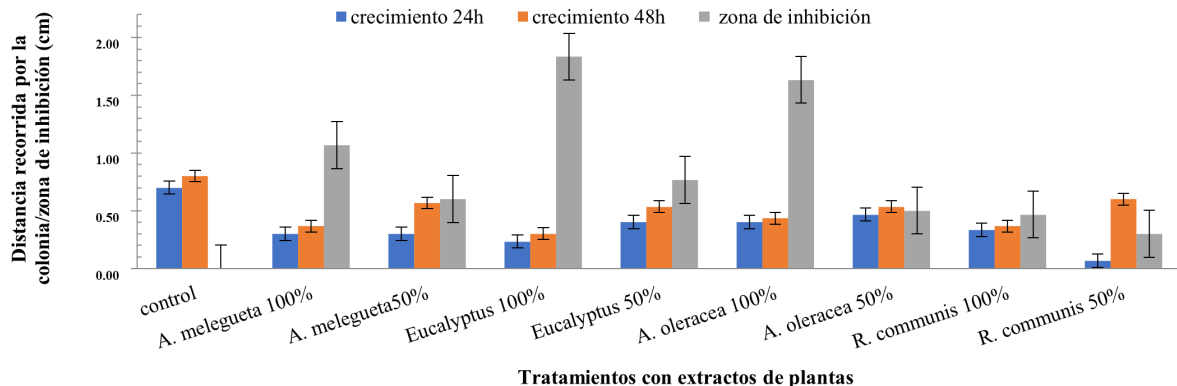


Figura 3. Efecto de los extractos vegetales sobre *X. axonopodis* in vitro.

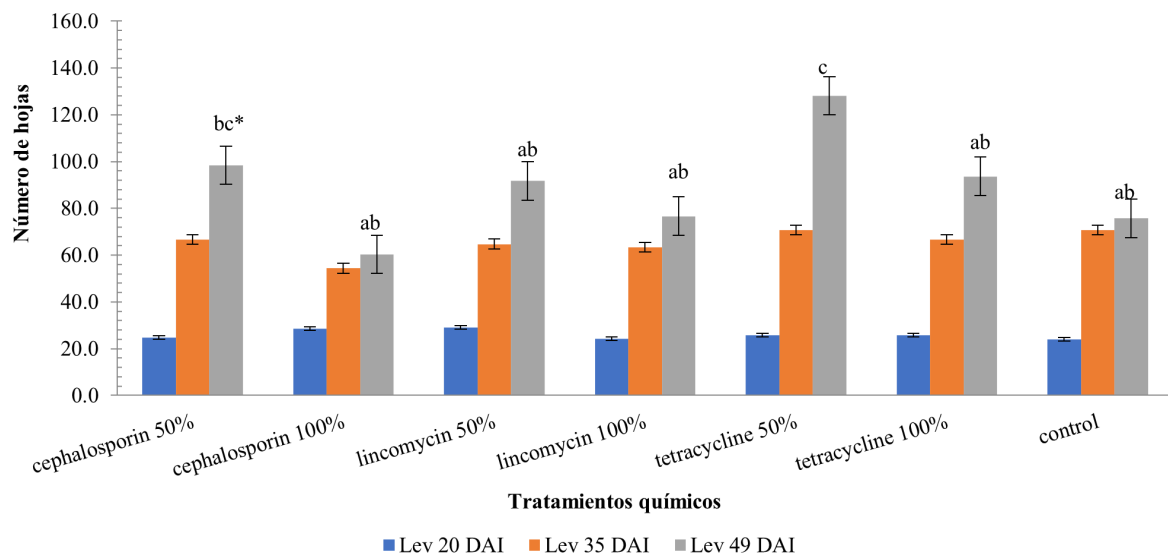


Figura 4. Efectos de los bactericidas sintéticos sobre el crecimiento del cultivo y *X. axonopodis* en invernadero. *Los valores con la(s) misma(s) letra(s) no difieren estadísticamente según la prueba de rangos múltiples de Duncan (DMRT), $p \leq 0,05$.

El peso fresco de las vainas y el peso de las semillas no mostraron diferencias significativas entre tratamientos cuando se aplicaron bactericidas químicos contra el patógeno (Figura 6). Sin embargo, se observaron diferencias entre los promedios de tratamiento cuando se compararon los pesos sin el

análisis estadístico formal. Es probable que, en estas variedades de frijol de crecimiento indeterminado, las diferencias en rendimiento puedan evidenciarse más adelante. El peso fresco del brote varió significativamente en comparación con el control.

De forma similar, en la Figura 7, el peso fresco de vainas y de semillas fue, en general, menor que en el ensayo con bactericidas químicos. El tiempo hasta la aparición de la primera flor fue mayor en los tratamientos con extractos vegetales en comparación con los tratamientos químicos. La causa de esta diferencia no está clara. Es probable que los agentes químicos favorezcan la floración o la formación de vainas, o que haya algún factor presente en el tejido vegetal que promueva la prolongación del crecimiento vegetativo. Estas suposiciones no han sido probadas. Aunque se observaron diferencias visibles entre pesos de semillas, brotes y vainas, estas no fueron estadísticamente significativas.

Finalmente, se adjunta la Figura 8 para mostrar la magnitud del daño que las enfermedades bacterianas pueden causar a las plantas, incluidos los frijoles. Se muestran plántulas muertas plantadas en ensayos de campo y tejidos de frijol dañados durante el experimento. La calidad de las imágenes tomadas *in vitro* fue baja, por lo que no se incluyen. El ensayo se repetirá en campo cuando se disponga de formulaciones químicas más seguras.

La escaldadura del frijol es sin duda una enfermedad devastadora que puede dejar al agricultor sin hojas ni frutos. Afecta sin distinción el forraje, el heno y las semillas. Lamentablemente, es imposible tener un control perfecto una vez que la enfermedad se establece en campo, lo que impli-

ca la imposibilidad de exportación o importación hacia países donde el producto podría alcanzar precios preferenciales. Los investigadores se esfuerzan constantemente por garantizar una producción sana, lo cual permite que los productores obtengan ganancias, valoren sus cultivos y adopten tecnologías modernas de producción.

Howard et al. (2005) argumentaron que los agentes causantes de la escaldadura del frijol pueden controlarse mediante fungicidas químicos (con acción bactericida). Buruchara et al. (2010) coincidieron al indicar que el tratamiento de semillas con compuestos de cobre y estreptomycin, así como la restricción de labores agrícolas durante lluvias, ha demostrado ser eficaz. Muedi and Fourie (2014) respaldaron esta postura, aunque enfatizaron que estos productos no eliminan bacterias ya establecidas en cultivos o suelos, sino que solo reducen su propagación. Estos resultados se confirmaron tanto *in vitro* como *in vivo*.

No obstante, Karavina et al. (2011) señalaron que el uso de estas medidas es viable únicamente a corto plazo y sostuvieron que es posible el control de la escaldadura del frijol mediante el uso de semillas libres de patógenos y productos químicos. Por ello, este estudio se llevó a cabo con el fin de probar la utilidad de los bactericidas en la producción de frijol común.

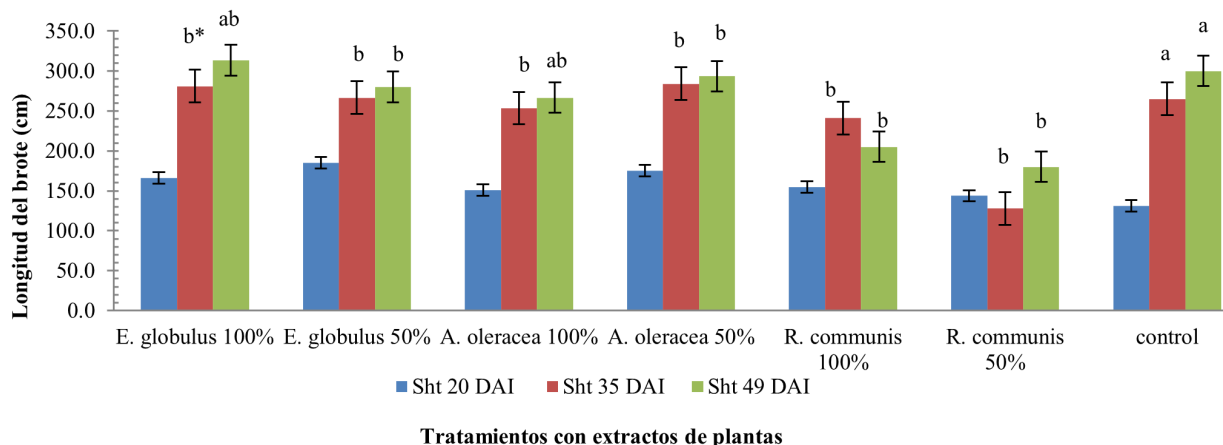


Figura 5. Efectos de los extractos vegetales sobre el crecimiento del cultivo y *X. axonopodis* en invernadero.

*Los valores con la(s) misma(s) letra(s) no difieren estadísticamente según DMRT, $p \leq 0,05$.

La investigación sobre el control de escaldadura bacteriana del frijol mediante extractos vegetales es escasa. El control de hongos con extractos vegetales ha sido ampliamente documentado. Wavare et al. (2017) informaron que los extractos acuosos de flores de *Tagetes erecta* mostraron actividad antifúngica contra *Sclerotium rofsii* en condiciones de invernadero.

Sanasam et al. (2018) demostraron que los extractos de ajo y cúrcuma inhibieron (67,7%) a *S. rofsii*. Ndifon et al. (2022) indicaron que extractos de jengibre y ajo aplicados como tratamiento de semillas y suelo controlaron significativamente la marchitez por *Fusarium* durante el cultivo de *Solanum aethiopicum*.

Hussain et al. (2009) demostraron que seis extractos vegetales, incluyendo *Eucalyptus camaldulensis*, inhibieron especies fúngicas al suprimir el crecimiento micelial. Ndifon and Lum (2021) informaron que todos los extractos evaluados (incluido *Eucalyptus globulus*) inhibieron significativamente el crecimiento de *Aspergillus niger* en comparación con el control. Las especies vegetales utilizadas en este estudio ya han mostrado una alta eficacia contra

hongos en nuestro laboratorio. Si bien en el presente estudio se observó un efecto prometedor, no lograron superar la eficacia de los bactericidas sintéticos. Por tanto, estos siguen teniendo un papel importante en el manejo de la escaldadura del frijol.

Dado que las enfermedades bacterianas de las plantas suelen tratarse con fungicidas como óxidos y oxicluros de cobre, y considerando que existen numerosas investigaciones sobre extractos vegetales frente a hongos, este estudio se diseñó con la esperanza de que algunos extractos eficaces contra hongos también lo fueran contra bacterias. Esto supondría una ventaja si los materiales de control resultan ser pesticidas de doble propósito.

Muchos investigadores han advertido sobre la toxicidad de los pesticidas químicos para los seres humanos, los animales y el medio ambiente. Sin embargo, son escasas las alternativas que se ofrecen a los agricultores para controlar la escaldadura del frijol. Las prácticas culturales y el uso de materiales resistentes pueden ser útiles en parcelas pequeñas o campos aislados. El fitomejoramiento se ve dificultado por la elevada tasa de autopolinización del frijol.

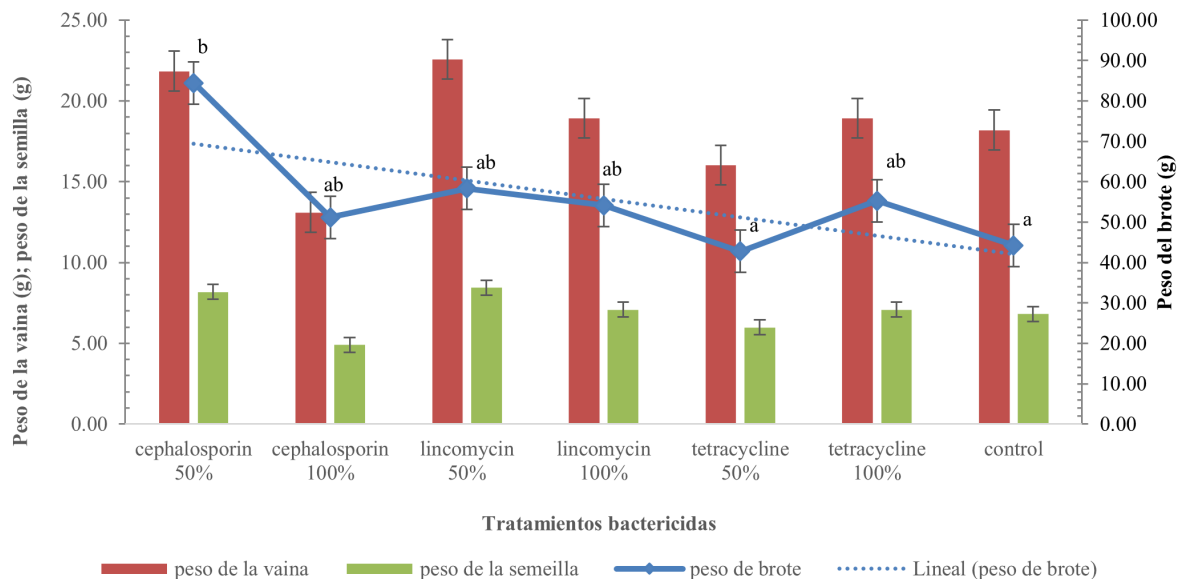


Figura 6. Efectos de *Xanthomonas sp.* sobre el peso del brote, de la vaina y de la semilla por planta bajo la influencia de bactericidas en invernadero.

*Los valores con la(s) misma(s) letra(s) no difieren estadísticamente según DMRT, $p \leq 0,05$.

No obstante, la resistencia a este agente patógeno es compleja y pueden coexistir múltiples variantes del mismo. La resistencia a la escaldadura común del frijol es particularmente compleja, ya que se han descrito 26 loci de resistencia cuantitativa. Hasta la fecha, los estudios transcriptómicos posteriores a la infección son escasos, y los mecanismos moleculares que subyacen a la susceptibilidad o resistencia son en gran parte desconocidos (Foucher et al., 2020).

Se puede incrementar la resistencia seleccionando por resistencia horizontal más que por resistencia vertical (García-Espinosa, 1997; Muimui et al., 2011). Estos resultados proporcionan una base para comprender mejor la herencia compleja de la resistencia a la escaldadura del frijol en variedades mesoamericanas (Ambachew et al., 2021). Estas son solo algunas referencias para motivar a los investi-

gadores a trabajar en el mejoramiento genético para la resistencia a esta enfermedad.

En situaciones complejas de enfermedad, la tolerancia o resistencia a la escaldadura puede ser mínima. ISTA (2007), Karavina et al. (2011) y Chen et al. (2021) recomiendan un enfoque integrado de manejo de enfermedades que incluya cuarentena, prácticas culturales y uso de variedades resistentes.

Trutmann et al. (1993) destacaron la eficacia de manipular el microclima en campos pequeños como medida viable de control. El manejo integrado de este patógeno probablemente será la herramienta más eficaz en manos de los agricultores. Esta investigación continúa actualmente en campo, con el objetivo de incorporar elementos de manejo integrado de la escaldadura común del frijol.

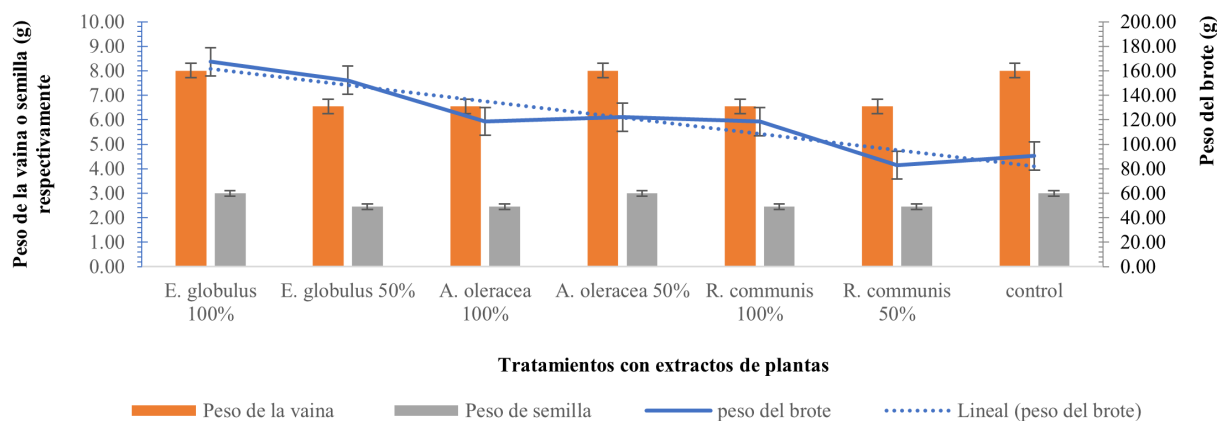


Figura 7. Efectos de *Xanthomonas sp.* sobre el peso del brote, de la vaina y de la semilla por planta bajo la influencia de extractos vegetales en invernadero.

4 Conclusiones

La exploración del potencial de los extractos vegetales y agentes bactericidas aplicados contra *Xanthomonas axonopodis* (la bacteria fitopatógena responsable de la escaldadura del frijol) reveló que el patógeno puede gestionarse eficazmente mediante el uso de productos botánicos y bactericidas. La linc-

micina, eritromicina, cefalosporina y tetraciclina demostraron una alta efectividad frente al microorganismo. De igual manera, *Eucalyptus globulus*, *Acemilla oleracea*, *Aframomum melegueta* y *Ricinus communis* mostraron eficacia frente al patógeno. No obstante, los antibióticos sintéticos superaron en todo momento a los extractos vegetales en términos de control.



Figura 8. Síntomas de la escaldadura del frijol durante el ensayo. **Arriba:** izquierda = hoja infectada en invernadero; centro = síntomas iniciales en invernadero; derecha = plántula moribunda en campo. **Abajo:** izquierda y centro = plantas sintomáticas y sanas; derecha = plántulas gravemente infectadas o muertas.

El uso de estos extractos vegetales y bactericidas permite la producción de plantas de frijol sanas. Sin embargo, se continuará investigando sobre la disponibilidad, formulación, seguridad e integración de estos agentes para el manejo sostenible de bacterias en la producción de frijol. Este estudio se desarrolló sin contratiempos en el laboratorio, pero en el invernadero el trabajo fue considerablemente más complejo debido al riesgo de contaminación. En condiciones de campo, la ejecución será aún más desafiante; por tanto, será necesario contar con instalaciones estandarizadas para continuar con esta línea de investigación.

Contribución de los autores

E.M.N.: Conceptualización, Curación de datos, Análisis formal, Adquisición de financiación, Investigación, Metodología, Recursos, Software, Supervisión, Validación, Visualización, Escritura– borrador original, Escritura– revisión y edición.

Referencias

Akibode, S. and Maredia, M. (2011). Global and regional trends in production, trade, and consumption of food legume crops. Technical report, Department of Agricultural, Food and Resource

- Economics, Michigan State University. Online: <https://n9.cl/od4h0>.
- Ambachew, D., Joshua, J., Mmbaga, M., and Blair, M. (2021). Sources of resistance to common bacterial blight and charcoal rot disease for the production of mesoamerican common beans in the southern united states. *Plants*, 10(5):998. Online: <https://bit.ly/4fvdm2R>.
- Beebe, S. E., Rao, I. M., Devi, M. J., and Polania, J. (2014). Common beans, biodiversity, and multiple stresses: Challenges of drought resistance in tropical soils. *Crop and Pasture Science*, 65(7):667–675. Online: <https://n9.cl/ofof4>.
- Buruchara, R., Mukankusi, C., and Ampofo, K. (2010). Bean disease and pest identification and management. Technical report, Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), PABRA. Online: <https://n9.cl/6fqrf>.
- CABI (2022). *Phaseolus vulgaris* (common bean) datasheet. CABI Compendium, Crop Protection Compendium. Online: <https://n9.cl/eflev>.
- Câmara, C. R. S., Urrea, C. A., and Schlegel, V. (2013). Pinto beans (*Phaseolus vulgaris* L.) as a functional food: Implications on human health. *Agriculture*, 3(1):90–111. Online: <https://n9.cl/w1ku0r>.
- Chen, N. W. G., Ruh, M., Darrasse, A., Foucher, J., Briand, M., Costa, J., Studholme, D. J., and Jacques, M. (2021). Common bacterial blight of bean: a model of seed transmission and pathological convergence. *Molecular Plant Pathology*, 22(12):1464–1480. Online: <https://n9.cl/4gyr5a>.
- FAO (1999). *Phaseolus* bean: post-harvest operations. inpho post-harvest compendium. Online: <https://n9.cl/f3szn>.
- FAOSTAT (2024). Dry bean production in 2022. crops/regions/worldlist/production quantity/year (pick lists). FAOSTAT Statistical Database. Online: <https://n9.cl/jl8if4>.
- Foucher, J., Ruh, M., Préveaux, A., Carrère, S., Pelletier, S., Briand, M., Serre, R., Jacques, M., and Chen, N. W. G. (2020). Common bean resistance to *Xanthomonas* is associated with up-regulation of the salicylic acid pathway and down-regulation of photosynthesis. *BMC Genomics*, 21:566. Online: <https://n9.cl/40wty>.
- García-Espinosa, R. (1997). Breeding for horizontal resistance in bean: an example from Mexico. *Bio-technology and Development Monitor*, 33(5).
- Grimault, V., Olivier, V., Rolland, M., Darrasse, A., and Jacques, M. A. (2024). Chapter 7: Validated seed health testing methods. international rules for seed testing, effective 1 January 2024, 7 21: Detection of *Xanthomonas axonopodis* pv. *phaseoli* and *Xanthomonas axonopodis* pv. *phaseoli* var. *fuscans* in *Phaseolus vulgaris* (bean) seed. Technical report, The International Seed Testing Association (ISTA), Richtiarkade 18, CH-8304 Wallisellen, Switzerland. Online: <https://n9.cl/45kwdv>.
- Howard, F. S., James, R. S., Robert, H., and Robert, L. F. (2005). *Compendium of beans diseases*. APS Publishing. Online: <https://n9.cl/squjl>.
- Hussain, F., Abid, M., Shahid, S., Farzana, S., and Akbar, M. (2009). Anti-fungal activity of some medicinal plants on different pathogenic fungi. *Pakistan Journal of Botany*, 47(5):2009–2013. Online: <https://n9.cl/exkpr>.
- ISTA (2007). Detection of *Xanthomonas axonopodis* pv. *phaseoli* and *Xanthomonas axonopodis* pv. *phaseoli* var. *fuscans* on *Phaseolus vulgaris*. annex to chapter 7. seed health testing methods. Technical report, International Rules for Seed Testing, Bassersdorf, Switzerland. Online: <https://n9.cl/9v9xf>.
- Kadege, E. L., Venkataramana, P., Assefa, T., Ndunguru, J. C., Mukankusi, C. M., Rubyogo, J. C., and Mbega, E. R. (2022). Pathogenicity and approaches for management of anthracnose in common bean (*Phaseolus vulgaris*) in Africa. *International Journal of Agriculture and Biology*, 28(4):269–280. Online: <https://n9.cl/k9ir6>.
- Kado, C. and Heskett, M. (1970). Selective media for isolation of *Agrobacterium*, *Corynebacterium*, *Erwinia*, *Pseudomonas*, and *Xanthomonas*. *Phytopathology*, 60:969–976. Online: <https://n9.cl/9lh2>.
- Karavina, C., Mandumbu, R., Parwada, C., and Tibugari, H. (2011). A review of the occurrence, biology and management of common bacterial blight. *Journal of Agricultural Technology*, 7(6):1459–1474. Online: <https://n9.cl/nmpjm>.

- Kimani, P. M., Buruchara, R., Ampofo, K., Pyndji, M., Chirwa, R., and Kirkby, R., editors (2005). *Breeding beans for smallholder farmers in Eastern, Central and Southern Africa: constraints, achievements and potential*. Pan-African Bean Research Network (PABRA) Millennium Workshop.
- Lacy, G. H. and Lukezic, F. L. (2004). *Pathogenic prokaryotes*, chapter Plant pathology concepts and laboratory exercises. CRC Press LLC. Online: <https://n9.cl/bm217>.
- Manju, B. E., Neh, A. T., and Bihwih, A. N. (2024). Evaluation of rhizobium and nitrogen fertilizer for the control of bacterial blight in green beans (*Phaseolus vulgaris* l.) varieties. *African Journal of Agricultural Research*, 20(6):426–433. Online: <https://n9.cl/p6lfu>.
- Mondo, M. J., Kimani, P. M., and Narla, R. D. (2019). Validation of effectiveness marker-assisted game selection for multiple disease resistance in common bean. *African Crop Science Journal*, 27(4):585–612. Online: <https://n9.cl/jjn4v>.
- Mounyr, B., Moulay, S., and Saad, K. I. (2016). Methods for *in vitro* evaluating antimicrobial activity: A review. *Journal of Pharmaceutical Analysis*, 6(2):71–79. Online: <https://n9.cl/n4cmb>.
- Muedi, H. and Fourie, D. (2014). Bacterial diseases of dry beans: Every producer's nightmare. Online: <https://n9.cl/0bkxh>.
- Muimui, K. K., Kimani, P. M., and Muthomi, J. W. (2011). Resistance and inheritance of common bacterial blight in yellow bean. *African Crop Science Journal*, 19(4):277–287. Online: <https://n9.cl/ixhwf>.
- Ndifon, E. M. (2022). Management of *Fusarium anthophilum* (pathogen of cereals and white yams) using different measures. *Journal of Botanical Research*, 4(4):12–20. Online: <https://n9.cl/wowmy>.
- Ndifon, E. M. (2023). Host-parasite interactions between *Solanum aethiopicum*, *Meloidogyne incognita*, and *Fusarium oxysporum* f.sp. melongenae as portrayed by disease traits and crop yield. *Yuzuncu Yil University Journal of Agricultural Sciences*, 33(3):461–477. Online: <https://n9.cl/xwe6c>.
- Ndifon, E. M., Chiv, M., Iyang, P., Ankrumah, E., Emeka, C. P. O., and Chinaka, C. (2022). Effect of plant extracts on *Fusarium oxysporum* f.sp melongenae wilt and growth of african garden egg (*Solanum aethiopicum* l.) in makurdi. *Notulae Scientia Biologicae*, 14(2):10912. Online: <https://n9.cl/dikbf>.
- Ndifon, E. M. and Lum, A. F. (2021). Assessment of white yam tuber rot disease and *in vitro* management of *Aspergillus niger* in ebonyi state, nigeria. *International Journal of Bioscience*, 19(4):32–40. Online: <https://n9.cl/og1f2>.
- OECD (2016). *Safety Assessment of Transgenic Organisms in the Environment, Volume 6: OECD Consensus Documents*, chapter Chapter 4. Common bean (*Phaseolus vulgaris*). OECD Publishing. Online: <https://bit.ly/4lxetkB>.
- Ordóñez, Y. F., Ruano, J., Avila, P., Berutti, L., Guerrero, P. C., and Ordóñez, P. E. (2023). *In vitro* antimicrobial activity of plant species against the phytopathogens; *Ralstonia solanacearum*, *Phytophthora infestans*, and *Neopestalotiopsis javaensis*. *Agriculture*, 13(10):2029. Online: <https://n9.cl/lfiv4>.
- Porch, T. G., Beaver, J. S., Debouck, D. G., Jackson, S. A., Kelly, J. D., and Dempewolf, H. (2013). Use of wild relatives and closely related species to adapt common bean to climate change. *Agronomy*, 3(2):433–461. Online: <https://n9.cl/yk1pyb>.
- Rajyalakshmi, K., Roopa, B., Saikat, D. M., Priyanka, D., Vadlamudi, S., and Subramaniam, G. (2016). Characterization of potential probiotic bacteria isolated from sorghum and pearl millet of the semi-arid tropics. *African Journal of Biotechnology*, 15(16):613–621. Online: <https://n9.cl/9ptwt9>.
- Saddler, G. S. and Bradbury, J. F. (2005). *Bergey's manual® of systematic bacteriology*, chapter Xanthomonadales ord. nov. Springer, Boston, M. A. Online: <https://n9.cl/nnsuf>.
- Sanasam, S., Sanatombi Devi, R. K., Beenakumari Devi, N., and Shashikumar Singh, O. (2018). Antagonistic activities of plant extracts against the phytopathogen *Sclerotium rolfsii*, during pre-harvest horticultural practice - a component of integrated disease management. *International Journal of Current Research in Life Sciences*, 7(11):2813–2815. Online: <https://n9.cl/wowmy>.

- Schaad, N. W., Jones, J. B., and Chun, W. (2001). *Laboratory guide for identification of plant pathogenic bacteria*. APS Press. St. Paul, MN, 3 edition. Online: <https://n9.cl/fogjj4>.
- Sinclair, J. B. and Dhingra, O. D. (1995). *Basic plant pathology methods*. CRC Press, 2 edition. Online: <https://n9.cl/i837b>.
- Trutmann, P., Voss, J., and Fairhead, J. (1993). Management of common bean diseases by farmers in the central african highlands. *International Journal of Pest Management*, 39(3):334–342. Online: <https://n9.cl/uq9uvk>.
- Wavare, S. H., Gade, R. M., and Shitole, A. V. (2017). Effect of plant extracts, bio agents and fungicides against *Sclerotium rolfsii* causing collar rot in chickpea. *Indian Journal of Pharmaceutical Science*, 79(4):513–520. Online: <https://n9.cl/tmjsm>.
- Wogu, M. D. and Ofuase, O. (2014). Microorganisms responsible for the spoilage of tomato fruits, *Lycopersicon esculentum*, sold in markets in benin city, southern nigeria. *Scholars Academic Journal of Biosciences*, 2(7):459–466. Online: <https://n9.cl/69v5y>.



ELECCIÓN DE PLANTA TRAMPA Y SUSTRATO PARA LA PRODUCCIÓN DE INÓCULO MICORRÍZICO

CHOICE OF TRAP PLANT AND SUBSTRATE FOR MYCORRHIZAL INOCULUM PRODUCTION

Jaime Naranjo-Morán^{*1,2}, Karen Olivo-Fernández², Milton Barcos-Arias^{2,3}
y Rodrigo Oviedo-Anchundia²

¹Universidad Politécnica Salesiana, UPS, Facultad Ciencias de la Vida, Laboratorio de Biotecnología Vegetal, Carrera de Ingeniería en Biotecnología. Campus María Auxiliadora sede Guayaquil. Km 19.5 Vía a la Costa, 090901. Guayaquil, Ecuador. [<https://ror.org/00f11af73>]

²Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Centro de Investigaciones Biotecnológicas del Ecuador, CIBE, Campus Gustavo Galindo Km. 30.5 vía Perimetral, P.O. Box 09-01-5863, Guayaquil, Ecuador. [<https://ror.org/04qenc566>]

³Universidad Espíritu Santo, UEES, Facultad de Ingeniería, Km 2.5 vía La Puntilla, Samborondón Apartado Postal 09-01-952, Ecuador. [<https://ror.org/00b210x50>]

*Autor para correspondencia: jnaranjo@ups.edu.ec

Manuscrito recibido el 25 de mayo de 2021. Aceptado, tras revisión el 27 de septiembre de 2022. Publicado el 1 de septiembre de 2025.

Resumen

Las plantas trampa de micorrizas arbusculares pueden ser especies cultivables o silvestres. Además de soportar la presión antropogénica, éstas son excelentes huéspedes para la multiplicación masiva de las micorrizas arbusculares. El objetivo de este trabajo es seleccionar la planta trampa y el sustrato para la propagación masiva de micorrizas arbusculares. Se evaluaron cuatro especies (*Cajanus cajan*, *Cynodon dactylon*, *Tagetes patula*, y *Plectranthus tomentosus*), dos tipos de sustratos (Sustrato 1: arena, cascarilla de arroz y vermiculita; Sustrato 2: arena, cascarilla de arroz y turba) y dos fuentes fosfatadas (fosfato tricálcico y roca fosfórica). A los 120 días después de la inoculación se evaluó el porcentaje micorrización y esporulación. Como resultado se identificó que la especie *Plectranthus tomentosus* en el sustrato 2 fue la más idónea, ya que obtuvo una micorrización total de 79,7% a una concentración de 1000 ppm de fosfato tricálcico, mientras que en el sustrato 1 tuvo 67,5% a la misma concentración de fosfato tricálcico. Esta especie también presentó un mayor número de esporas (638 esporas / 100 g suelo) en el sustrato 1 a una concentración de 1000 ppm de fosfato tricálcico. En conclusión, la planta trampa y composición del sustrato tiene influencia directa en la producción de inóculo micorrízico.

Palabras clave: Endomicorrizas, Esporulación, Huésped, Micorrización, Sustratos.

Abstract

Arbuscular mycorrhizal trap plants can be cultivated or wild species. In addition to withstanding anthropogenic pressure, these are excellent hosts for massive multiplication of arbuscular mycorrhizae. The objective of this work is to select the most suitable trap plant and substrate for the massive propagation of arbuscular mycorrhizal fungi. Four species were evaluated (*Cajanus cajan*, *Cynodon dactylon*, *Tagetes patula*, and *Plectranthus tomentosus*), two types of substrates (Substrate 1: sand, rice husk and vermiculite; Substrate 2: sand, rice husk and peat) and two phosphate sources (tricalcium phosphate and rock phosphate). At 120 days after inoculation, the percentage of mycorrhization and sporulation was evaluated. As a result, it was identified that the species *Plectranthus tomentosus* in substrate 2 was the most suitable, since it obtained a total mycorrhization of 79.7% at a concentration of 1000 ppm of tricalcium phosphate, while in substrate 1 it had 67.5% at the same concentration of tricalcium phosphate. This species also presented a higher number of spores (638 spore / 100 g soil) in substrate 1 at a concentration of 1000 ppm of tricalcium phosphate. In conclusion, the trap plant and substrate composition had a direct influence on the production of mycorrhizal inoculum.

Keywords: Endomycorrhizae, Sporulation, Host, Mycorrhization, Substrates.

Forma sugerida de citar: Naranjo-Morán, J., Olivo-Fernández, K., Barcos-Arias, M., y Oviedo-Anchundia, R. (2025). Elección de planta trampa y sustrato para la producción de Inóculo Micorrízico. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*. Vol. 42(2):78-89. <https://doi.org/10.17163/lgr.n42.2025.05>.

IDs Orcid:

Jaime Naranjo-Moran: <https://orcid.org/0000-0002-4410-9337>

Karen Olivo-Fernández: <https://orcid.org/0009-0002-6484-1645>

Rodrigo Oviedo-Archundia: <https://orcid.org/0000-0001-7986-3711>

Milton Barcos-Arias: <https://orcid.org/0000-0003-0863-6778>

1 Introducción

Las plantas trampas, las características ambientales y la limitada dispersión son factores que afectan la multiplicación masiva de los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) (Ramalho da Silva et al., 2014). Las asociaciones simbióticas de las comunidades de los HMA con las plantas trampas son complejas, dado que las redes de hifas micorrízicas conectan diversos sistemas rizosféricos y regulan los flujos de nutrientes, las comunicaciones e interacciones de competencia dentro de los nichos ecológicos de cada planta. La coexistencia con la comunidad vegetal ha llevado a especializaciones interespecíficas, como el establecimiento de plántulas en nuevos territorios (Tedersoo et al., 2020; Van Geel et al., 2018).

En condiciones naturales la mayoría de las plantas se encuentran colonizadas por HMA, no obstante, la presencia de estos hongos puede verse afectada por factores antropogénicos como el uso excesivo de fertilizantes, fungicidas y herbicidas, ocasionando la disminución o desaparición de la biodiversidad micorrízica presente en los agroecosistemas (Davison et al., 2020). Los HMA son relevantes en la agricultura porque brindan múltiples beneficios a las plantas, como la solubilización de fósforo en el suelo y la sostenibilidad del sistema de producción agrícola (Deepika and Kothamasi, 2015).

Las plantas trampas son hospederos eficientes de HMA. Una planta hospedera promisoría es el maíz (*Zea mays* L.), puesto que permite la producción de una o más especies de HMA. Otras especies también se han usado como plantas trampas con el fin de multiplicar esporas de HMA, estas especies pertenecen a las familias *Solanaceae*, *Fabaceae*, *Cucurbitaceae*, *Amaryllidaceae*, *Lamiaceae*, entre otras (Koske and Gemma, 1995; Salas and Blanco, 2000), ya que sus ciclos biológicos hacen fácil su adaptación al método de cultivo en macetas al reducir los tiempos de producción hasta los 1,5 meses (Salas and Blanco, 2000).

El puerro (*Allium ampeloprasum* L.) es una especie ineficaz para producir inóculo a partir de los HMA, pues puede estar influenciado por las condiciones ambientales, lo que plantea la hipótesis de que la diversidad de plantas se estimula y retarda entre sí para la producción de esporas (Liu and

Wang, 2003). El parámetro de mayor importancia para seleccionar las plantas trampas es la cuantificación del número de producción de esporas por gramo de suelo o sustrato referencial. Un factor limitante de la producción de esporas está asociado con el nivel de P adicionado al sustrato; este elemento puede interferir en la producción de esporas en plantas de ají (*Capsicum annuum* L.), pepino (*Cucumis sativus* L.), puerro (*Allium ampeloprasum* L.) y rosa de muerto (*Tagetes patula* L.).

Otro factor limitante vinculado a la producción es el material vegetal inicial, los factores climáticos y la diversidad genética de los HMA en el sustrato compuesto (Koske and Gemma, 1995; Salas and Blanco, 2000; Schmidt et al., 2010). La composición del sustrato también influye en la multiplicación de inóculo micorrízico, especialmente en la absorción de nutrientes de la planta trampa, como es el caso del P, Mg y Ca (Gao et al., 2019), en particular, la dosificación de P en la fuente de nutrición tiene un efecto diferencial en los beneficios proporcionados por los HMA (Alarcón, 2003), lo que afecta el rendimiento de la producción de esporas en las plantas trampas a consecuencia del origen de la fuente fosfatada, ya que la fertilización fosfatada puede mejorar o disminuir el potencial endógeno de la colonización micorrízica (Covacevich et al., 2006).

Por lo tanto, el objetivo de esta investigación es elegir una planta trampa y un sustrato prominente para la propagación masiva de micorrizas arbusculares.

2 Materiales y Métodos

2.1 Condiciones del sistema

Esta investigación se desarrolló en el invernadero del Centro de Investigaciones Biotecnológicas del Ecuador (CIBE) de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), ubicado en el km 30.5 vía perimetral en el Campus Gustavo Galindo (Latitud: 2° 9'3.12" S y Longitud: 79°57'13.03" W).

Las condiciones climáticas promedio registradas en el invernadero durante el desarrollo de este estudio fueron, 26 °C de temperatura, 65% de humedad relativa y una luminosidad constante durante los meses de mayo y agosto. El material vegetal utilizado como planta trampa fue *Cajanus cajan*, *Cyno-*

don dactylon, *Tagetes patula* y *Plectranthus tomentosus*, todas obtenidas de semillas silvestres excepto *P. tomentosus*, donde se utilizaron esquejes de 10 cm. Se realizaron semilleros en gavetas plásticas con el fin de obtener plantas homogéneas para el ensayo. Cuando las plántulas obtuvieron dos hojas verdaderas fueron trasplantadas a macetas de polipropileno con un volumen de 2 kg de sustrato según los tratamientos e inoculadas con 20 g de un consorcio nativo (inóculo nativo purificado) de HMA conformado por *Acaulospora sp.*, *Ambispora sp.*, *Diversispora sp.*, *Entrophospora sp.*, *Funeliformis sp.* y *Glomus sp.* a una concentración de 300 esporas totales por cada 100 g de sustrato (50 esporas por cada género). Cabe mencionar que el inóculo de HMA fue obtenido del banco de micorrizas arbusculares del CIBE – ESPOL.

Para la ejecución de este estudio se realizó un diseño bifactorial. El factor A (fuente fosfatada y sustrato) con cuatro niveles de concentración fosfatada y el B fueron las cuatro especies de plantas estudiadas. Los sustratos contenían arena, cascarilla de arroz y vermiculita (S1) y arena, cascarilla de arroz y turba (S2). Las fuentes fosfatadas utilizadas fueron fosfato tricálcico (FT) y roca fosfórica (RF). Las cuatro especies de plantas usadas en este experimento fueron *C. cajan*, *C. dactylon*, *T. patula* y *P. tomentosus*. Se aplicaron tres dosis de 150, 500, 1000 ppm y un control de 0 ppm de fuente cruda fosfatada a las plantas trampas, con tres repeticiones en cada tratamiento. Los sustratos y materiales utilizados fueron esterilizados de forma estricta antes de iniciar la experimentación para evitar la contaminación cruzada con agentes patógenos. Se midieron los parámetros agronómicos para determinar los atributos de selección en las especies, y los fisiológicos de la masa radicular: altura, número de hojas, biomasa seca, índice del contenido de clorofila, porcentaje de micorrización y número de esporas a los 120 días después de la inoculación. Adicionalmente a la fertilización fosfatada, las plantas fueron fertilizadas con 10 ml de solución modificada de Steiner, aplicándose tres veces por semana (Galindo Pardo et al., 2014).

2.2 Medición de parámetros agronómicos y fisiológicos

En el presente estudio se midió la altura, desde el cuello de la planta hasta la yema terminal; el número

de hojas emitidas por cada especie, contabilizada hasta la última hoja extendida en su totalidad; se determinó la biomasa seca total utilizando una estufa a una temperatura de 80 °C hasta obtener un peso constante (López-Hidalgo et al., 2018); se analizó el índice del contenido de clorofila a los 120 días, y para su efecto se seleccionó la tercera hoja más joven que contaba con un buen desarrollo, y la medición se realizó entre las 10:00 y 11:00 horas, cuando hubo una excelente luminosidad, mediante el uso de un medidor CCM-200 PLUS, Opti-Science (Redha et al., 2019).

Para medir el porcentaje de micorrización total en las raíces de las plantas trampas, éstas se sometieron a estrés hídrico durante una semana, cuando se suspendió el riego y fertilización. Transcurrido este periodo se tomó una muestra combinada de 10 g de raíces secundarias de las tres réplicas de cada tratamiento. Las raíces se lavaron con agua potable para retirar impurezas, después se cortaron y colaron en un recipiente ámbar, aplicando 1 ml de KOH al 10% por 10 minutos en autoclave (125 °C y 15 de presión). Una vez finalizado este tiempo se retiró el KOH, lavando con agua y se aplicó HCl al 1% durante 3 minutos para acidificar las muestras, luego se retiró el HCl sin lavar las raíces y finalmente se aplicó azul de tripano al 0,05% y se esterilizó durante 15 minutos. Una vez esterilizadas las muestras se dejaron enfriar y se procedió a colocar 10 raicillas en cada portaobjeto. Seguidamente se agregó una gota de lactoglicerol, se colocó en una placa cubreobjeto para observar las estructuras infectivas y se determinó el porcentaje de micorrización (McGonigle et al., 1990).

Para determinar el número de esporas se tomó una muestra de 100 g de sustrato por triplicado de cada tratamiento. Las muestras se evaluaron con la metodología de tamizado húmedo, donde se utilizaron tamices de 45, 106 y 710 μm , y luego se centrifugaron en un gradiente de tween 20 más sacarosa durante 5 min a 2000 rpm (Gerderman and Nicholson, 1963). El sobrenadante final se disolvió en agua para lavar las esporas (Furlan et al., 1980). El contenido final se vertió en una caja de Petri segmentada donde se realizó el conteo haciendo uso de un estereoscopio. El criterio para determinar la densidad de esporas de todas las especies combinadas fue el mismo: una densidad baja corresponde < 1 esporas/g de sustrato; densidad media correspon-

de 1 – 10 esporas/g de sustrato; y densidad alta corresponde > 10 esporas/g de sustrato (Sieverding, 1983).

2.3 Análisis estadístico

Los resultados se sometieron a un análisis de varianza (ANOVA) y a la prueba de Tukey con valores de $p < 0,05$ para las variables estudiadas, haciendo uso del software Infostat V.1.2.0 (2017).

3 Resultados y Discusión

3.1 Parámetros de crecimiento de las plantas trampas con fuentes fosfatadas de fosfato tricálcico (FT) y roca fosfórica (RF)

En lo que respecta a la altura, en las plantas de *C. cajan* se pudo observar que en la interacción del S1 con la fuente fosfatada a 1000 ppm de FT, estas lograron alturas de 79 cm respecto al testigo que obtuvo 59 cm (Tabla 1), mientras que en la misma concentración en el S2 se obtuvo una altura de 59 cm en *C. cajan*, respecto al control que tuvo 51 cm. Con la fuente fosfatada RF tuvieron una altura de 71 cm a la máxima concentración respecto al control que obtuvo 67 cm en el S1. En este sustrato se obtuvieron 47 hojas respecto al testigo con 41 hojas (Tabla 1). De igual manera, en el S2 se alcanzó un patrón similar. En cuanto al número de hojas, en el S1 se obtuvieron 51 hojas a una concentración de 1000 ppm de FT.

Las plantas de *C. dactylon* en S1 y S2 obtuvieron una altura de 25 cm en el tratamiento con 1000 ppm de FT. El número de hojas más alto ocurrió en el S2 y como resultado se obtuvieron 50 hojas en el tratamiento con 1000 ppm de FT, respecto al testigo con 73 hojas en S2. En el S1 se alcanzaron 13 unidades CCI en el tratamiento de 1000 ppm de RF, respecto al testigo que obtuvo 5 unidades CCI. En S1 y S2 para esta especie no se alcanzaron diferencias significativas en las variables evaluadas.

Las plantas de *T. patula* en S1 tuvieron una altura de 6 cm en el tratamiento con 1000 ppm de FT, en comparación al testigo que tuvo un valor de 8 cm. Vale la pena mencionar que en esta especie no hubo muchos cambios respecto a S2, ya que mantuvo un

patrón similar a las otras especies estudiadas. Por otra parte, el tratamiento con 1000 ppm de RF alcanzó una altura de 9 cm, en comparación al testigo que tuvo un valor de 11 cm en S1, mientras que en S1 y S2 las diferencias no fueron significativas.

La especie *P. tomentosa* obtuvo un crecimiento en el S2 de 12 cm de altura en el tratamiento de 1000 ppm RF, comparado con el testigo que alcanzó 17 cm (Tabla 1).

El contenido de clorofila evaluado en las plantas de *C. cajan*, *T. patula* y *P. tomentosa* no presentó diferencias significativas en ambos sustratos (Tabla 1), mientras que la clorofila obtenida en *C. dactylon* en el S1 fue de 14 unidades CCI en el tratamiento de 1000 ppm de FT, respecto al testigo con 7 unidades CCI. Las plantas de *T. patula* obtuvieron en el S2 una clorofila de 11 unidades CCI en el tratamiento de 1000 ppm de FT, en comparación al testigo con 13 unidades CCI. El resto de las especies no tuvieron diferencias estadísticas significativas en ambos sustratos, lo que significa que las especies se adaptan de mejor manera a los sustratos y pueden mantener una mayor capacidad fotosintética y tolerancia al estrés hídrico producido.

Los datos experimentales revelaron grandes diferencias en el crecimiento de las plantas con el S2, siendo este el que más se adaptó a casi todas las especies de plantas evaluadas. El S1 fue el que más influencia tuvo en las plantas de *P. tomentosa*. Estos resultados muestran que la selección de la planta trampa tiene un rol fundamental en la producción de inóculo micorrízico. Estudios recientes demuestran que la planta trampa juega un papel relevante en el ensamblaje de la comunidad micorrízica presente en el inóculo (Van Geel et al., 2018), ya que las especies vegetales y la comunidad fúngica de sitios específicos fortalecen la restauración ecológica (Wu et al., 2020).

3.2 Micorrización de las plantas trampas

La micorrización más alta en el S1 con ambas fuentes fosfatadas ocurrió en plantas de *P. tomentosa* con una micorrización superior al 60%, mientras que la micorrización más baja se dio en *C. cajan*, que alcanzó una micorrización alrededor del 25% en ambas fuentes fosfatadas (Tabla 2).

Tabla 1. Crecimiento de plantas trampas en sustratos S1 y S2 y fuentes de fosfato FT y RF (en concentraciones 0, 150, 500 y 1000 ppm): altura (cm), número de hojas, clorofila (U/CCI).

		Fosfato tricálcico (FT)					
Plantas trampas	Tratamiento (ppm)	S1			S2		
		Altura (cm)	Número de hojas	Clorofila (U/CCI)	Altura (cm)	Número de hojas	Clorofila (U/CCI)
<i>Cajanus cajan</i>	0 (control)	*59 ± 6,5 ^a	*36 ± 1,8 ^a	44 ± 1,1 ^a	51 ± 1,7 ^a	35 ± 0,5 ^a	47 ± 2,2 ^a
	150	*66 ± 1,4 ^b	*43 ± 1,0 ^b	45 ± 0,7 ^a	59 ± 4,4 ^a	40 ± 2,9 ^a	51 ± 1,4 ^a
	500	*61 ± 4,3 ^b	*46 ± 2,7 ^b	39 ± 3,0 ^a	56 ± 2,0 ^a	38 ± 3,4 ^a	44 ± 3,9 ^a
	1000	*79 ± 1,4 ^b	*51 ± 2,3 ^b	48 ± 4,1 ^a	59 ± 1,5 ^a	39 ± 3,2 ^a	51 ± 0,9 ^a
<i>Cynodon dactylon</i>	0 (control)	23 ± 1,7 ^a	65 ± 4,0 ^a	*7 ± 0,3 ^b	27 ± 1,2 ^a	*73 ± 0,3 ^b	9 ± 0,8 ^a
	150	19 ± 1,2 ^a	55 ± 3,7 ^a	*6 ± 1,8 ^a	28 ± 1,1 ^a	*64 ± 8,0 ^b	19 ± 5,1 ^a
	500	23 ± 2,0 ^a	61 ± 3,6 ^a	*14 ± 3,6 ^b	26 ± 0,6 ^a	*51 ± 2,6 ^a	16 ± 1,0 ^a
	1000	25 ± 1,1 ^a	63 ± 5,3 ^a	*14 ± 4,8 ^b	25 ± 1,0 ^a	*50 ± 3,4 ^a	15 ± 0,5 ^a
<i>Tagetes patula</i>	0 (control)	8 ± 0,5 ^a	22 ± 1,1 ^a	12 ± 0,9 ^a	9 ± 0,3 ^a	25 ± 2,0 ^a	*13 ± 0,0 ^b
	150	8 ± 1,0 ^a	22 ± 1,3 ^a	14 ± 4,0 ^a	10 ± 0,5 ^a	22 ± 0,6 ^a	*11 ± 0,2 ^b
	500	7 ± 1,8 ^a	20 ± 0,6 ^a	16 ± 5,0 ^a	8 ± 0,6 ^a	23 ± 1,3 ^a	*12 ± 1,1 ^b
	1000	6 ± 0,0 ^a	20 ± 0,6 ^a	19 ± 3,1 ^a	9 ± 0,5 ^a	24 ± 1,1 ^a	*11 ± 1,1 ^a
<i>Plectranthus tomentosus</i>	0 (control)	13 ± 2,0 ^a	64 ± 2,4 ^a	13 ± 2,8 ^a	14 ± 1,1 ^a	*70 ± 0,0 ^a	15 ± 4,4 ^a
	150	13 ± 1,7 ^a	68 ± 4,3 ^a	16 ± 0,3 ^a	11 ± 1,1 ^a	*74 ± 0,6 ^b	17 ± 0,5 ^a
	500	9 ± 0,6 ^a	58 ± 4,0 ^a	11 ± 1,9 ^a	11 ± 0,8 ^a	*80 ± 1,7 ^c	15 ± 3,6 ^a
	1000	12 ± 2,0 ^a	60 ± 7,6 ^a	15 ± 2,9 ^a	12 ± 0,5 ^a	*76 ± 0,8 ^c	18 ± 0,1 ^a
		Roca fosfórica (RF)					
<i>Cajanus cajan</i>	0 (control)	67 ± 1,1 ^a	41 ± 1,2 ^a	44 ± 1,1 ^a	63 ± 4,3 ^a	41 ± 1,2 ^a	46 ± 1,1 ^a
	150	60 ± 1,8 ^a	42 ± 1,4 ^a	45 ± 0,9 ^a	52 ± 0,6 ^a	36 ± 1,4 ^a	46 ± 1,0 ^a
	500	58 ± 6,0 ^a	43 ± 4,5 ^a	43 ± 1,7 ^a	65 ± 2,5 ^a	42 ± 4,5 ^a	49 ± 2,0 ^a
	1000	71 ± 4,9 ^a	47 ± 3,7 ^a	42 ± 1,3 ^a	61 ± 0,3 ^a	41 ± 3,7 ^a	50 ± 0,4 ^a
<i>Cynodon dactylon</i>	0 (control)	20 ± 1,7 ^a	*68 ± 4,0 ^a	*5 ± 1,1 ^a	30 ± 0,0 ^a	67 ± 2,6 ^a	13 ± 0,2 ^a
	150	23 ± 1,2 ^a	*49 ± 0,6 ^a	*20 ± 2,7 ^b	28 ± 0,6 ^a	64 ± 2,6 ^a	21 ± 8,7 ^a
	500	22 ± 0,3 ^a	*44 ± 0,8 ^b	*13 ± 2,0 ^b	27 ± 1,3 ^a	68 ± 4,9 ^a	19 ± 3,1 ^a
	1000	22 ± 2,0 ^a	*63 ± 2,6 ^b	*13 ± 1,7 ^b	28 ± 1,0 ^a	59 ± 6,2 ^a	16 ± 2,5 ^a
<i>Tagetes patula</i>	0 (control)	11 ± 2,0 ^a	21 ± 1,7 ^a	18 ± 1,9 ^a	9 ± 0,6 ^a	20 ± 0,6 ^a	*14 ± 0,8 ^b
	150	11 ± 0,8 ^a	20 ± 1,1 ^a	14 ± 1,0 ^a	9 ± 0,5 ^a	22 ± 1,7 ^a	*13 ± 0,9 ^b
	500	10 ± 3,1 ^a	22 ± 1,1 ^a	16 ± 1,6 ^a	8 ± 1,0 ^a	22 ± 1,1 ^a	*12 ± 0,5 ^b
	1000	9 ± 3,0 ^a	22 ± 1,3 ^a	17 ± 1,7 ^a	9 ± 1,3 ^a	24 ± 1,3 ^a	*15 ± 0,4 ^b
<i>Plectranthus tomentosus</i>	0 (control)	13 ± 1,2 ^a	66 ± 4,0 ^a	12 ± 1,3 ^a	*17 ± 0,8 ^b	*73 ± 1,6 ^a	18 ± 2,2 ^a
	150	10 ± 1,2 ^a	59 ± 3,3 ^a	12 ± 4,0 ^a	*13 ± 0,8 ^a	*79 ± 2,4 ^b	18 ± 2,5 ^a
	500	10 ± 0,3 ^a	63 ± 6,6 ^a	9 ± 1,1 ^a	*15 ± 1,1 ^b	*84 ± 0,6 ^b	15 ± 1,3 ^a
	1000	10 ± 1,0 ^a	58 ± 3,0 ^a	7 ± 1,5 ^a	*12 ± 0,5 ^a	*72 ± 3,0 ^a	18 ± 0,9 ^a

Sustratos: S1= arena, cascarilla de arroz y vermiculita, S2: arena, cascarilla de arroz y turba; FT= Fosfato tricálcico, RF= Roca fosfórica. Valores promedios ± el error estándar, las comparaciones están realizadas según la fuente fosfatada utilizada * Letras distintas en la misma hilera indican diferencias significativas según test de Tukey (p<0.05).

Las especies *C. dactylon* y *T. patula* obtienen porcentajes similares, en donde destaca la concentración de 150 ppm de FT y RF, pues ambas especies alcanzan valores más altos de micorrización. La especie *P. tomentosus* en el S2 fue la que obtuvo mayor porcentaje de micorrización, obteniendo 71 y 74% en el tratamiento de 1000 ppm con FT y RF respectivamente, en comparación a los testigos que lograron 68 y 63%, lo que demuestra una mayor

afinidad del consorcio micorrízico al sustrato utilizado y al tipo de planta estudiada, respecto al resto de especies vegetales estudiadas.

Muchos reportes han mencionado que la fuente fosfatada podría afectar a las micorrizas del inóculo inicial. Al respecto, la especie que mejor respondió a las más altas concentraciones de fuente fosfatada (FT y RF) fue *P. tomentosus*, lo que puede deberse a

la disponibilidad de P influenciado por el pH (Lu et al., 2019). Los patrones de absorción de P pueden diferir acorde a la disponibilidad en el sustrato o el suelo (Stewart et al., 2005). Nuestros resultados evidencian que RF brinda P y otros elementos necesarios para las plantas y la comunidad micorrízica, pues estas interacciones siempre están moduladas por las condiciones del hábitat de las plantas trampas (Hu et al., 2019; Li et al., 2018, 2020). En el sustrato ocurren cambios en la abundancia relativa de ciertas especies de HMA (*Gigasporaceae*, *Glomeraceae*, *Diversisporaceae* y *Acaulosporaceae*), la clave es atribuida a la fertilidad de nutrientes en el micro ecosistema de sustrato para el monitoreo continuo (Xiang et al., 2016).

3.3 Producción de esporas en los sustratos

Este estudio encontró que distintas plantas trampas pueden adaptarse a un inóculo micorrízico y a la composición del sustrato, constituyéndose en un anidamiento específico por afinidad durante el

ciclo de vida de la planta. Esto fue respaldado por las diferencias observadas en la producción de esporas. El hecho de que utilizáramos varias plantas trampas dependientes de micorrizas y un inóculo nativo en estrés hídrico demuestra que estos factores pueden haber aportado significativamente a los efectos sinérgicos en el desarrollo de las plantas trampas. En plantas de *P. tomentosa* crecidas en el S1 se obtuvo mayor número de esporas con valores de 637 y 623 esporas / 100 g de suelo en FT y RF, respectivamente, a una concentración de 1000 ppm respecto a los testigos (T0) que lograron 434 y 438 esporas / 100 g de suelo en FT y RF (Figura 1).

Por otro lado, la especie que menor número de esporas obtuvo fue *C. cajan* con 195 y 198 esporas / 100 g de suelo en FT y RF respectivamente, a una concentración de 1000 ppm, en comparación a los T0 que alcanzaron 211 y 166 esporas / 100 g de suelo en FT y RF, respectivamente. Las otras especies tuvieron comportamientos similares en los tratamientos con 150 y 500 ppm de fuentes fosfatadas.

Tabla 2. Porcentajes de micorrización de raíces de las plantas trampas en los sustratos S1 y S2, y las fuentes de fosfatos FT y RF (en concentraciones 0, 150, 500 y 1000 ppm).

Plantas trampas	Tratamiento (ppm)	Porcentaje de micorrización (%)			
		FT		RF	
		S1	S2	S1	S2
<i>Cajanus cajan</i>	0	27±2,5 ^c	25±2,8 ^c	35±1,3 ^f	33±2,5 ^d
	150	25±1,7 ^b	32±1,0 ^d	41±3,5 ^g	18±0,6 ^a
	500	31±2,0 ^e	23±1,3 ^b	29±2,2 ^d	31±3,3 ^d
	1000	22±0,9 ^a	31±4,2 ^d	24±0,7 ^b	32±0,7 ^d
<i>Cynodon dactylon</i>	0	39±1,9 ^f	39±2,7 ^d	42±1,7 ^g	38±0,0 ^e
	150	46±3,6 ⁱ	47±2,4 ^e	43±1,7 ^c	34±2,8 ^d
	500	42±1,3 ^g	34±2,8 ^d	34±2,4 ^f	42±3,2 ^e
	1000	45±2,4 ^h	31±4,2 ^e	38±2,6 ^f	48±0,7 ^f
<i>Tagetes patula</i>	0	63±1,7 ^l	42±1,1 ^g	60±1,8 ^l	51±0,0 ^e
	150	71±3,2 ^l	50±1,6 ^f	62±5,2 ^l	45±2,0 ^e
	500	45±5,4 ^h	45±1,3 ^e	55±3,5 ^k	45±3,8 ^e
	1000	46±5,5 ⁱ	46±1,8 ^e	49±1,9 ^j	40±4,0 ^e
<i>Plectranthus tomentosa</i>	0	68±4,9 ^l	68±3,1 ^h	67±2,4 ^l	63±0,6 ^h
	150	63±1,3 ^l	79±1,9 ^h	61±1,6 ^l	75±2,4 ^h
	500	65±3,5 ^l	77±2,5 ^h	67±2,6 ^l	79±3,1 ^h
	1000	69±1,3 ^l	71±6,1 ^h	69±4,2 ^l	74±1,0 ^h

Sustratos: S1= arena, cascarilla de arroz y vermiculita; S2= arena, cascarilla de arroz y turba; FT= Fosfato tricálcico, RF= Roca fosfórica, Valores promedios ± el error estándar, las comparaciones están realizadas según la fuente fosfatada utilizada * Letras distintas en la misma hilera indican diferencias significativas según test de Tukey (p<0.05).

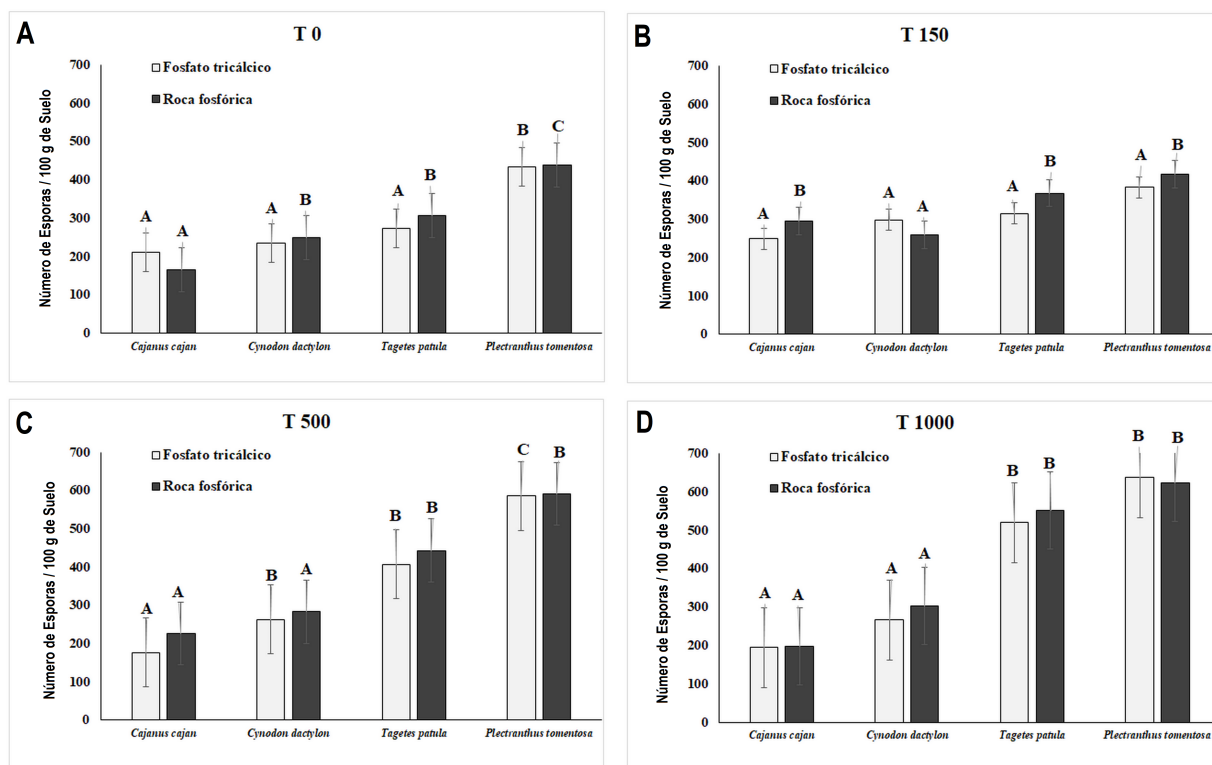


Figura 1. Esporas producidas en el sustrato 1; A) Tratamiento 0 (testigo), B) Tratamiento 150 ppm, C) Tratamiento 500 ppm, D) Tratamiento 1000 ppm. Los límites de las barras representan el error estándar con un intervalo de confianza del 95%. Letras distintas sobre las barras indican diferencias estadísticas significativas según test de Tukey ($p < 0,05$).

Las plantas de *P. tomentosus* crecidas en el S2 lograron un mayor número de esporas con valores de 612 y 623 esporas / 100 g de suelo en FT y RF, respectivamente, a una concentración de 1000 ppm, respecto a T0 que lograron 426 y 506 esporas / 100 g de suelo en FT y RF (Figura 2). La especie con menor número de esporas fue *C. cajan* con valores de 256 y 238 esporas / 100 g de suelo en FT y RF respectivamente, a una concentración de 1000 ppm, respecto a T0 que lograron 187 y 133 esporas / 100 g de suelo en FT y RF respectivamente. Las otras especies tuvieron patrones similares en los tratamientos con 150 y 500 ppm de fuertes fosfatadas.

Los resultados demuestran que *P. tomentosus* presentó una mayor micorrización de raíces al quinto mes con micorrización superior al 60 y 70% en FT y RF, respectivamente donde se observaron las estructuras infectivas propias de HMA (Figura 3). Lo anterior sugiere una complementariedad eficaz al momento de seleccionar una planta trampa para el uso biotecnológico o para la restauración de suelos

contaminados. Las plantas trampa que enfrentan múltiples factores de estrés y al ser inoculadas con distintas especies de micorrizas son más eficientes que aquellas que no han sido inoculadas o repotenciadas con mayor diversidad de géneros de HMA (Crossay et al., 2019). Encontramos que la altura, el contenido de clorofila y la biomasa de las plantas trampa responden al tipo de sustrato utilizado y a la fuente fosfatada (FT o RF). Estos resultados concuerdan con los reportes de plantas inoculadas con micorrizas que incrementan la fotosíntesis, la expansión radicular, la absorción de agua y los nutrientes (Selvakumar et al., 2018). Esta información es relevante para el criterio de selección de la planta trampa, puesto que un indicador de rendimiento aceptable en la producción de biomasa puede estimular o retardar la colonización micorrízica, y esto se traduce en producción de esporas (Liu and Wang, 2003).

La densidad de plantas trampa también se considera un indicador limitante, debido a que las plan-

tas compiten por el P inorgánico en los sustratos, lo que podría mejorar la producción de esporas (Fabińska et al., 2020), en específico las plantas que macollan como es el caso de *C. dactylon*.

Independiente de las variaciones de nutrientes, la red fúngica de los HMA mantiene a las plantas trampas con un suministro constante de P, siendo estos administradores exitosos de los recursos

(Van't Padje et al., 2021b). En los patrones de colonización se ha demostrado que el tiempo y requerimiento de nutrientes de la planta trampa tienen un rol importante, debido a que estos son muy dinámicos y difíciles de predecir en condiciones naturales, por lo que constituye un desafío investigar las relaciones anfitrión-simbionte que sean medibles y confiables con la realidad de las asociaciones naturales (Van't Padje et al., 2021a).

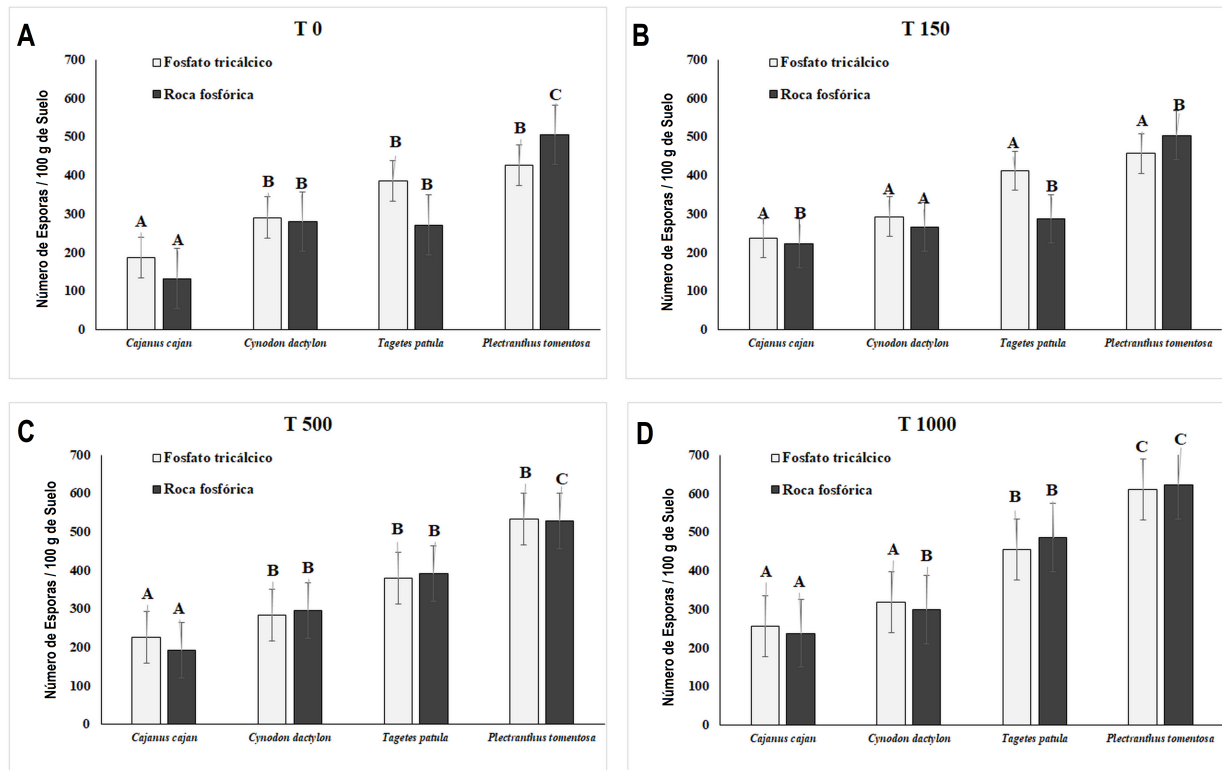


Figura 2. Esporas producidas en el sustrato 2; A) Tratamiento 0 (testigo), B) Tratamiento 150 ppm, C) Tratamiento 500 ppm, D) Tratamiento 1000 ppm. Los límites de las barras representan el error estándar con un intervalo de confianza del 95%. Letras distintas sobre las barras indican diferencias estadísticas significativas según test de Tukey ($p < 0,05$).

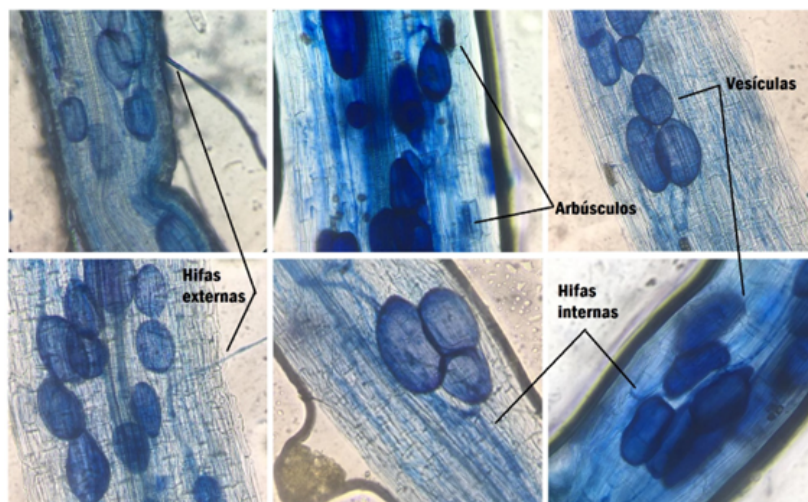


Figura 3. Raíces micorrizadas de *P. tomentosa* observadas en un microscopio óptico con una magnificación de 400X, a los 120 días de la inoculación.

4 Conclusiones

De las cuatro plantas trampa evaluadas la que mejor respondió al consorcio micorrízico fue la especie de *Plectranthus tomentosa*. Esta especie posee características prometedoras para la producción de inóculo micorrízico, independiente del tipo de sustrato utilizado. La planta trampa de *Cajanus cajan* fue el hospedero menos eficiente en la producción de esporas de HMA. La dosificación de las fuentes fosfatadas no afectó a la colonización micorrízica ni a la producción de esporas de las especies en estudios, pero sí afectó su crecimiento.

Agradecimientos

Al personal del Centro de Investigaciones Biotecnológicas CIBE-ESPOL, quienes facilitaron la ejecución del proyecto; agradecemos a la Corporación Ecuatoriana para el Desarrollo de la Investigación y la Academia (CEDIA), por su apoyo financiero al presente proyecto.

Contribución de los autores

J.N.M.: Conceptualización, Escritura- borrador original, Metodología. K.O.F.: Investigación, Curación de datos. R.O.A.: Escritura- revisión y edición, Análisis formal, Recursos, Visualización. M.B.A.: Admi-

nistración de proyecto, Supervisión, Adquisición de financiación.

Referencias

- Alarcón, A. and Ferrera-Cerrato, R. (2003). Aplicación de fósforo e inoculación de hongos micorrízicos arbusculares en el crecimiento y estado nutricional de *Citrus volkameriana* tan & pasq. *Terra Latinoamericana*, 21(1):91-99. Online: <https://n9.cl/78cwt>.
- Covacevich, F., Marino, M. A., and Echeverría, H. E. (2006). The phosphorus source determines the arbuscular mycorrhizal potential and the native mycorrhizal colonization of tall fescue and wheatgrass. *European Journal of Soil Biology*, 42(3):127-138. Online: <https://n9.cl/alej7>.
- Crossay, T. and Majorel, C., Redecker, D., Gensous, S., Medevielle, V., Durrieu, G., Yvon Cavaloc, Y., and Amir, H. (2019). Is a mixture of arbuscular mycorrhizal fungi better for plant growth than single-species inoculants? *Mycorrhiza*, 29(4):325-339. Online: <https://n9.cl/d6jg5>.
- Davison, J., García de León, D., Zobel, M., Moora, M., Bueno, C. G., Barceló, M., Gerz, M., León, D., Meng, Y., Pillar, V. D., Sepp, S.-K., Soudzilovskaia, N. A., Tedersoo, L., Vaessen, S., Vahter, T.,

- Winck, B., and Öpik, M. (2020). Plant functional groups associate with distinct arbuscular mycorrhizal fungal communities. *New Phytologist*, 226(4):1117–1128. Online:https://n9.cl/8dae6.
- Deepika, S. and Kothamasi, D. (2015). Soil moisture—a regulator of arbuscular mycorrhizal fungal community assembly and symbiotic phosphorus uptake. *Mycorrhiza*, 25(1):67–75. Online:https://n9.cl/kvt2bz.
- Fabiańska, I., Pesch, L., Koebke, E., Gerlach, N., and Bucher, M. (2020). Neighboring plants divergently modulate effects of loss-of-function in maize mycorrhizal phosphate uptake on host physiology and root fungal microbiota. *PLoS one*, 15(6):e0232633. Online:https://n9.cl/puj1p.
- Furlan, V., Bartschi, H., and Fortin, J. (1980). Media for density gradient extraction of endomycorrhizal spores. *Transactions of the British Mycological Society*, 75(2):336–338. Online:https://n9.cl/7iufjh.
- Galindo Pardo, F. V., Fortis Hernández, M., Preciado Rangel, P., Trejo Valencia, R., Segura Castruita, M., and Orozco Vidal, J. A. (2014). Caracterización físico-química de sustratos orgánicos para producción de pepino (*Cucumis sativus* L.) bajo sistema protegido. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 5(7):1219–1232. Online:https://n9.cl/e1xlc.
- Gao, C., Montoya, L., Xu, L., Madera, M., Hollingsworth, J., Purdom, E., Hutmacher, R. B., Dahlberg, J. A., Coleman-Derr, D., Lemaux, P. G., and Taylor, J. W. (2019). Strong succession in arbuscular mycorrhizal fungal communities. *The ISME Journal*, 13(1):214–226. Online:https://n9.cl/x4aa4.
- Gerderman, J. and Nicholson, T. (1963). Spores of mycorrhizal endogene species extracted from soil by wet sieving and decanting. *Transactions of the British Mycological Society*, 46(2):235–244. Online:https://n9.cl/cd3na.
- Hu, J., Cui, X., Wang, J., and Lin, X. (2019). The non-simultaneous enhancement of phosphorus acquisition and mobilization respond to enhanced arbuscular mycorrhization on maize (*Zea mays* L.). *Microorganisms*, 7(12):651. Online:https://n9.cl/3yzdx.
- Koske, R. E. and Gemma, J. N. (1995). Vesicular-arbuscular mycorrhizal inoculation of hawaiian plants: a conservation technique for endangered tropical species. *Pacific Science*, 49(2):181–191. Online:https://n9.cl/mkat7.
- Li, X., Xu, M., Christie, P., Li, X., and Zhang, J. (2018). Large elevation and small host plant differences in the arbuscular mycorrhizal communities of montane and alpine grasslands on the tibetan plateau. *Mycorrhiza*, 28(7):605–619. Online:https://n9.cl/nlc48.
- Li, X., Xu, M., Li, X., Christie, P., Wagg, C., and Zhang, J. (2020). Linkages between changes in plant and mycorrhizal fungal community composition at high versus low elevation in alpine ecosystems. *Environmental Microbiology Reports*, 12(2):229–240. Online:https://n9.cl/86n4p.
- Liu, R. and Wang, F. (2003). Selection of appropriate host plants used in trap culture of arbuscular mycorrhizal fungi. *Mycorrhiza*, 13(3):123–127. Online:https://n9.cl/0nd60.
- López-Hidalgo, H., Martínez-González, J. C., Balseca-Guzmán, D., Gusqui-Vilema, L., and Cienfuegos-Rivas, E. (2018). Crecimiento inicial de dos variedades de gandul (*Cajanus cajan*) en el trópico de ecuador. *Abanico Veterinario*, 8(2):33–46. Online:https://n9.cl/e3si3t.
- Lu, N., Xu, X., Wang, P., Zhang, P., Ji, B., and Wang, X. (2019). Succession in arbuscular mycorrhizal fungi can be attributed to a chronosequence of *Cunninghamia lanceolata*. *Scientific Reports*, 9:18057. Online:https://n9.cl/g6i6p.
- McGonigle, T. P., Miller, M. H., Evans, D. G., Fairchild, G. L., and Swan, J. A. (1990). A new method which gives an objective measure of colonization of roots by vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi. *New Phytologist*, 115(3):495–501. Online:https://n9.cl/p5l49x.
- Ramalho da Silva, I., Aragão de Mello, C. M., Ferreira Neto, R. A., Alves da Silva, D. K., de Mello, A. L., Oehl, F., and Costa Maia, L. (2014). Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi along an environmental gradient in the brazilian semiarid. *Applied Soil Ecology*, 84:166–175. Online:https://n9.cl/lgqki.

- Redha, A., Al-Hasan, R., José, J., Saju, D., and Afzal, M. (2019). The photosynthetic apparatus of *Conocarpus lancifolius* engl. (combretaceae) suffers damage in soil contaminated with heavy metals. *Botany*, 97(3):179–189. Online:https://n9.cl/7i5rr.
- Salas, E. and Blanco, F. (2000). Selección de plantas hospederas y efecto del fosforo para la producción de inoculo de hongos formadores de micorrizas arbusculares por el método de cultivo en macetas. *Agronomía Costarricense*, 24(1):19–28. Online:https://n9.cl/ti1ngp.
- Schmidt, B., Domonkos, M., Şumālan, R., and Biró, B. (2010). Suppression of arbuscular mycorrhiza's development by high concentrations of phosphorous at *Tagetes patula* l. *Research Journal of Agricultural Science*, 42(4):156–162. Online:https://n9.cl/hxyrc.
- Selvakumar, G., Yi, P. H., Lee, S. E., Shagol, C. C., Han, S. G., Sa, T., and Chung, B. N. (2018). Effects of long-term subcultured arbuscular mycorrhizal fungi on red pepper plant growth and soil glomalin content. *Mycobiology*, 46(2):122–128. Online:https://n9.cl/6bumxh.
- Sieverding, E. (1983). Manual de métodos para la investigación de la micorriza vesículo arbuscular en el laboratorio. Technical report, Centro Internacional de Agricultura Tropical. CIAT. Online:https://n9.cl/vzyrpk.
- Stewart, L. I., Hamel, C., Hogue, R., and Moutoglis, P. (2005). Response of strawberry to inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi under very high soil phosphorus conditions. *Mycorrhiza*, 15(8):612–619. Online:https://n9.cl/6twcd.
- Tedersoo, L., Bahram, M., and Zobel, M. (2020). How mycorrhizal associations drive plant population and community biology. *Science*, 367(6480):eaba1223. Online:https://n9.cl/o4981.
- Van Geel, M., Jacquemyn, H., Plue, J., Saar, L., Kasari, L., Peeters, G., van Acker, K., Honnay, O., and Ceulemans, T. (2018). Abiotic rather than biotic filtering shapes the arbuscular mycorrhizal fungal communities of european seminatural grasslands. *New Phytologist*, 220(4):1262–1272. Online:https://n9.cl/5ra9e.
- Van't Padjé, A., Oyarte Galvez, L., Klein, M., Hink, M. A., Postma, M., Shimizu, T., and Kiers, E. T. (2021a). Temporal tracking of quantum-dot apatite across in vitro mycorrhizal networks shows how host demand can influence fungal nutrient transfer strategies. *The ISME journal*, 15(2):435–449. Online:https://n9.cl/evjq0g.
- Van't Padjé, A., Werner, G., and Kiers, E. T. (2021b). Mycorrhizal fungi control phosphorus value in trade symbiosis with host roots when exposed to abrupt 'crashes' and 'booms' of resource availability. *The New phytologist*, 229(5):2933–2944. Online:https://n9.cl/bp7i3.
- Wu, S., You, F., Wu, Z., Bond, P., Hall, M., and Huang, L. (2020). Molecular diversity of arbuscular mycorrhizal fungal communities across the gradient of alkaline fe ore tailings, revegetated waste rock to natural soil sites. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(1-12):11968–11979. Online:https://n9.cl/e4hgo.
- Xiang, X., Gibbons, S. M., He, J. S., Wang, C., He, D., Li, Q., Ni, Y., and Chu, H. (2016). Rapid response of arbuscular mycorrhizal fungal communities to short-term fertilization in an alpine grassland on the qinghai-tibet plateau. *PeerJ*, 4:e2226. Online:https://n9.cl/z37ke.



EFFECTS OF CHANGE IN LAND USE AND CLIMATE CHANGE ON THE POTENTIAL DISTRIBUTION OF SUGARCANE AT VALLE DEL CHOTA, ECUADOR

EFFECTS OF CHANGE IN LAND USE AND CLIMATE CHANGE ON THE
POTENTIAL DISTRIBUTION OF SUGARCANE AT VALLE DEL CHOTA, ECUADOR

Paúl Arias-Muñoz^{*1}, Evelin Lizeth Chamorro-Benavides², Sandy Anabel
Patiño-Yar², Gabriel Jácome-Aguirre¹ y Oscar Rosales³

¹Laboratorio de Geociencias y Medio Ambiente (GEOMA), Facultad de Ingeniería en Ciencias Agropecuarias y Ambientales, Universidad Técnica del Norte (UTN), 100105 Ibarra, Ecuador. [<https://ror.org/03f0t8b71>]

²Carrera de Recursos Naturales Renovables, Facultad de Ingeniería en Ciencias Agropecuarias y Ambientales, Universidad Técnica del Norte (UTN), 100105 Ibarra, Ecuador. [<https://ror.org/03f0t8b71>]

³Laboratorio de Geomática, Facultad de Ingeniería en Ciencias Agropecuarias y Ambientales, Universidad Técnica del Norte (UTN), 100105 Ibarra, Ecuador. [<https://ror.org/03f0t8b71>]

*Autor para correspondencia: dparias@utn.edu.ec

Manuscrito recibido el 14 de diciembre de 2022. Aceptado, tras revisión el 17 de septiembre de 2024. Publicado el 1 de septiembre de 2025.

Resumen

La caña de azúcar es un cultivo de importancia socioeconómica, el cual no está exento de perturbaciones internas y externas. La presente investigación se desarrolló en el Valle del Chota, que es uno de los sectores donde tradicionalmente se cultiva la caña de azúcar en Ecuador. El objetivo es determinar los efectos del cambio futuro de cobertura de suelo en su desarrollo hasta el año 2031 y los efectos del cambio climático en su distribución para el periodo 2025-2035 en los escenarios RCP 4,5 y RCP 8.5. Para ello, se proyectó el uso de suelo a los años 2022 y 2031 utilizando como información base las coberturas de uso de suelo de los años 1999 y 2011. Para la proyección futura bajo escenarios de cambio climático se utilizó la zonificación agroecológica del cultivo y los cambios que ocurrirán en la temperatura y precipitación en los escenarios climáticos. Los resultados pronostican que, por efecto del cambio de uso de suelo, el cultivo de caña de azúcar disminuirá su superficie en alrededor del 14,65% desde el año 2022 hasta el 2031. En contraste, bajo los escenarios climáticos RCP 4,5 y RCP 8,5, para el periodo 2025-2035 las superficies óptimas para la producción de caña de azúcar aumentarán en igual proporción, reflejando un aumento de la disponibilidad hídrica.

Palabras clave: Caña de azúcar, Cambio de uso de suelo, Cambio climático, RCP, Chota.

Abstract

Sugarcane is a socio-economically important crop, which is not exempt from internal and external disturbances. This research was carried out at the Chota Valley, one of the sectors where sugarcane is traditionally grown in Ecuador. The aim is to determine the effects of future land cover change on its development until 2031 and the effects of climate change on its distribution for the period 2025-2035 in the scenarios RCP 4.5 and RCP 8.5. For this purpose, land use was projected for 2022 and 2031, using land use coverages for 1999-2011 as the base information. Future projections under climate change scenarios were carried out using the agro ecological zoning of crops and changes in temperature and precipitation climate scenarios. The results forecast that due to land use change, sugarcane cultivation will decrease its area by about 14.65% from 2022 to 2031. However, the research findings under the RCP 4.5 and RCP 8.5 climate scenarios for the 2025-2035 period indicate a significant increase in the optimal areas for sugarcane production in equal proportion, mirroring the rise in water availability.

Keywords: Sugarcane, Land use change, climate change, RCP, Chota.

Forma sugerida de citar: Arias-Muñoz, P., Chamorro-Benavides, E.L., Patiño-Yar, S.A., Jácome-Aguirre, G. y Rosales, O. (2025). Efectos del cambio de uso de suelo y cambio climático en la distribución potencial de la caña de azúcar en el Valle del Chota, Ecuador. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*. Vol. 42(2):90-105. <https://doi.org/10.17163/lgr.n42.2025.06>.

IDs Orcid:

Paúl Arias-Muñoz: <https://orcid.org/0000-0002-1263-2748>

Evelin Lizeth Chamorro-Benavides: <https://orcid.org/0000-0002-2085-5933>

Sandy Anabel Patiño-Yar: <https://orcid.org/0000-0001-9245-0444>

Gabriel Jácome-Aguirre: <https://orcid.org/0000-0001-8305-6226>

Oscar Rosales: <https://orcid.org/0000-0001-7131-6203>

1 Introducción

La caña de azúcar (*Sacharum officinarum*) es una planta perenne de la familia Poaceae perteneciente al género *Saccharum*, utilizada para la producción de azúcar. La caña de azúcar transformó la actividad empresarial industrial, al pasar de ser un cultivo que provee alimento a uno que suministra insumos para las industrias sucroquímica y energética (Gómez-Merino et al., 2015). La importancia económica de este cultivo radica en tres características principales: a) tiene una alta capacidad de producción; b) utiliza de manera eficaz los recursos e insumos productivos; y c) puede ser transformado localmente en productos de mayor valor, como sacarosa, melaza, etanol y energía (Gómez-Merino et al., 2015). Actualmente es uno de los cultivos más importantes debido a que su producción contribuye a la alimentación de más de la mitad de la población mundial (Moraes et al., 2015; Som-ard et al., 2018), la cual ha incrementado su producción a nivel mundial, al pasar de 448 millones de toneladas cultivadas en 8.9 millones de hectáreas en el año 1961 a 2000 millones de toneladas cultivadas en 27 millones de hectáreas en el año 2020 (El Chami et al., 2020).

El origen de la caña de azúcar se encuentra en las zonas tropicales de clima templado cálido del sudeste de Asia y Nueva Guinea, y se produce principalmente en regiones tropicales y subtropicales a nivel mundial (Som-ard et al., 2021). En Ecuador, la caña de azúcar fue introducida a las zonas tropicales y subtropicales del país con la conquista española y actualmente sobrepasa las 82 000 ha (Mendoza et al., 2005). El Valle del Chota, ubicado entre las provincias del Carchi e Imbabura en Ecuador, es uno de los sectores subtropicales que cuenta con características edáficas adecuadas para la producción de este cultivo (Echeverría and Uribe, 1981). La caña de azúcar llegó al Valle del Chota con los primeros hacendados españoles en el año 1550, sin embargo, no es hasta el año 1570 cuando el cultivo de caña empieza a reemplazar a los principales cultivos de la época que eran coca y algodón (Cornel Feijoo, 1991). La producción de caña de azúcar se ha convertido en una de las principales fuentes de ingresos de la población, la cual representa el segundo asentamiento afrodescendiente en Ecuador. Esta actividad agrícola no ha estado exenta de perturbaciones internas y externas, como el reemplazo

por otros cultivos (Espín Díaz, 1999) o los probables efectos del cambio climático.

En todo el mundo, la agricultura es el sector económico que más sufre las fluctuaciones climáticas, por lo que es necesario implementar estrategias efectivas para su adaptación y mitigación (Zhao and Li, 2015). El cambio climático surge de las alteraciones en el equilibrio energético de la Tierra, las cuales son provocadas tanto por factores y procesos naturales como por intervenciones humanas (Intergovernmental Panel On Climate Change (IPCC), 2023). Es así que este fenómeno representa nuevos retos para la productividad agrícola, debido a que a largo plazo modificará las zonas climáticas y agroecológicas, especialmente en regiones como América Latina (López Feldman and Hernández Cortés, 2016). La Organización Internacional del Azúcar (2013) señala que para el año 2050 el cambio climático sería favorable para el aumento de la superficie idónea para el cultivo de caña de azúcar en un 160%. Los cambios combinados de las condiciones climáticas y atmosféricas, como el aumento de la temperatura, radiación solar y concentración de CO₂ en la atmósfera, incrementarían el rendimiento de la caña de azúcar (Guerra and Hernández, 2012).

Sin embargo, a nivel global no hay consenso sobre los posibles efectos locales del cambio climático en la producción de caña de azúcar. Marin et al. (2013) y Todd et al. (2015) señalan que en Brasil y en Luisiana (Estados Unidos) respectivamente, el cambio climático mejorará el rendimiento en la producción de caña de azúcar debido a que en Brasil se mejora la eficiencia del uso del agua, y en Luisiana se reduce la incidencia de las heladas. Sin embargo, Singh and El Maayar (1998) determinaron que en el Caribe, la caña de azúcar puede disminuir en un 20-40% bajo un escenario de cambio climático de doble concentración de CO₂, y Knox et al. (2010) determinaron mediante el uso de modelos climáticos que en Suazilandia, el rendimiento de la caña de azúcar disminuirá en el futuro.

Estos datos confirman que los agricultores deberán adaptarse a las nuevas condiciones del cultivo de caña de azúcar bajo los probables efectos del cambio climático, sean estos positivos o negativos. En Ecuador, de acuerdo con las proyecciones de rutas de concentración representativas (RCP, por sus siglas en inglés), la temperatura nacional po-

dría incrementar en 2 °C, con excepción de la región Amazónica e Insular (Ministerio de Ambiente de Ecuador, 2019). Este cambio en la temperatura propiciará la reducción de la capacidad adaptativa de las ciudades ecuatorianas al cambio climático (Arias-Muñoz et al., 2022), y sin duda alterará los rendimientos de cultivos, como la caña de azúcar. Aunque los rendimientos futuros de la caña de azúcar no solo pueden verse afectados por los impactos del cambio climático, también son afectados por las dinámicas propias del cambio de uso de suelo. Es así como el objetivo del presente estudio fue determinar la superficie actual de caña de azúcar, año 2022, y proyectar su superficie al año 2031 bajo un escenario normal con tendencia al cambio de uso de suelo y bajo dos escenarios de cambio climático (RCP 4,5 y RCP 8,5). De este modo, se evaluaron los cambios de uso de suelo mediante la aplicación de matriz de transición y se proyectó el uso de suelo, que incluyó la cobertura de caña de azúcar mediante el uso de cadenas de Markov.

Mientras que la proyección futura, bajo escenarios de cambio climático, se realizó con base en la zonificación agroecológica del cultivo y los impactos que tendrán los requisitos agroecológicos, temperatura y precipitación en escenarios de cambio climático. Por lo tanto, el reto consistió en identificar áreas óptimas agroecológicas, determinando los posibles escenarios de cambio y necesidades que puedan surgir en una región, para especificar estrategias de adaptación que permitan reducir el impacto del cambio climático en pro de un desarrollo sostenible (Oviedo and León, 2010).

2 Materiales y Métodos

2.1 Área de estudio

El área de estudio de la presente investigación corresponde al valle seco del río Chota, localizado al norte del Ecuador entre las provincias Imbabura y Carchi, entre los meridianos 78° 15' y 77° 55' de longitud Oeste, y paralelos 0° 30' y 0° 7' de latitud Norte (Espín Díaz, 1999). Esta área presenta una superficie de 9247 ha y se caracteriza por ser un valle encajonado dentro de la hoya del Chota (Figura 1), situado entre las dos estribaciones de la cordillera de los Andes (Winckell et al., 1997). También se caracteriza por presentar un relieve de llanura y penillanura, considerando que el principal cauce

que lo atraviesa es el río Chota. El valle del Chota presenta una formación vegetal de matorral seco montano bajo (Sierra, 1999) y está ubicado entre los 1500 a 1800 m.s.n.m (Espín Díaz, 1999). De acuerdo con la clasificación climática de Pourrut (1983), el clima del valle se considera megatérmico árido a semiárido con una temperatura media anual promedio de 17,2 a 19,5°C y una precipitación media anual que varía entre 559 y 945 mm. La vegetación característica de la zona está compuesta principalmente por algarrobo (*Acacia macracantha* y *Mimosa pudica*), huarango (*Mimosa quitensis*), ovo (*Spondias mombin*), fréjol (*Phaseolus vulgaris*), fréjol guandul (*Cajanus cajan*) y caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) (Mena, 2001).

La población del valle del Chota es mayoritariamente afrodescendiente. La población afro que se asentó en el valle tuvo como origen la importación de mano de obra-esclava por los jesuitas para las haciendas de caña de azúcar (Carrascal Jijón, 2016), lo que permitió que en el valle del Chota se formara una comunidad afrodescendiente con identidad cultural e histórica. De hecho, se considera el segundo asentamiento en el Ecuador que concentra más población afrodescendiente, solo después de la provincia de Esmeraldas (Ortiz Villalva, 2011). El valle está conformado por los siguientes centros poblados, Piquiucho, Chalguayaco, Juncal, Pusir Grande, Pusir Chiquito, Carpuela, Tumbatú, Ambuquí, San Vicente de Pusir, Chota y Mascarilla. En estas comunidades se estima que alrededor del 64,4% de la población se encuentra en situación de pobreza y hasta el 2001 el 15% de la población era considerada analfabeta (Ortiz Villalva, 2011; Peralta et al., 2001).

Las principales actividades económicas son: agricultura (86%), manufactura (10%) y comercio (4%) (Peralta et al., 2001). No obstante, la agricultura en la región ha sufrido considerablemente debido a la fragmentación excesiva de la tierra, la insuficiencia de agua para el riego, la limitada tecnología agrícola y la introducción de nuevos mercados (Ortiz Villalva, 2011). Esto ha obligado a la migración de la población hacia zonas urbanas, constante rotación de cultivos e incluso la incursión en nuevas actividades económicas (Espín Díaz, 1999). Por otro lado, en 1964 se creó el Ingenio Azucarero del Norte (IANCEM), con el fin de aprovechar las condiciones idóneas para el cultivo de caña de azúcar y de mejorar las condiciones económicas de los campesinos

del sector (Espín Díaz, 1999). Sin embargo, el valle fue por poco tiempo abastecedor de caña de azúcar para el ingenio, porque el campesino local observó que otros cultivos como el fréjol (*Phaseolus vulgaris*), pimienta (*Capsicum annuum*) o tomate (*Lycopersicon esculentum*) eran más rentables para el comercio de los mercados locales de las ciudades cercanas: Pimampiro, Ibarra y Tulcán (Espín Díaz, 1999).

2.2 Determinación de la situación actual (año 2022) y expansión futura del cultivo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) al año 2031

Se determinó la distribución actual para el año 2022, y futura para el año 2031 de la caña de azúcar, con base en una proyección del uso de suelo del valle del Chota, cuyos años de referencia fueron 1999 y 2011 empleando los softwares, ArcGIS 10.8.2 y TerrSET 1.0. Para la proyección de Cambio de cobertura y Uso de Suelo (CUS) se consideraron las siguientes variables predictoras: pendiente del te-

reno, modelo de elevación DEM, distancia euclidiana de la zona urbana, vías y distancia euclidiana de las vías (Figura 2a-e).

Las variables según sus características fueron clasificadas en estáticas y dinámicas. Se definieron como estáticas a las siguientes variables: a) modelo de elevación DEM y, b) pendientes que son aquellas que no pueden presentar cambios; mientras que las dinámicas fueron, c) distancia euclidiana de los poblados, d) distancia euclidiana de vías, y, e) vías.

Además, para la proyección del CUS, tal como lo recomiendan Ortega Chuquín and Arias Muñoz (2022), se estandarizaron las características espaciales de las variables predictoras: pendientes, altitud, distancia a vías y distancia a zonas urbanas, junto a los archivos espaciales de los años de referencia de cobertura y uso de suelo (años 1999 y 2011). Para ello se realizó una homologación de la resolución espacial y radiométrica en los archivos geoespaciales (Tabla 1).

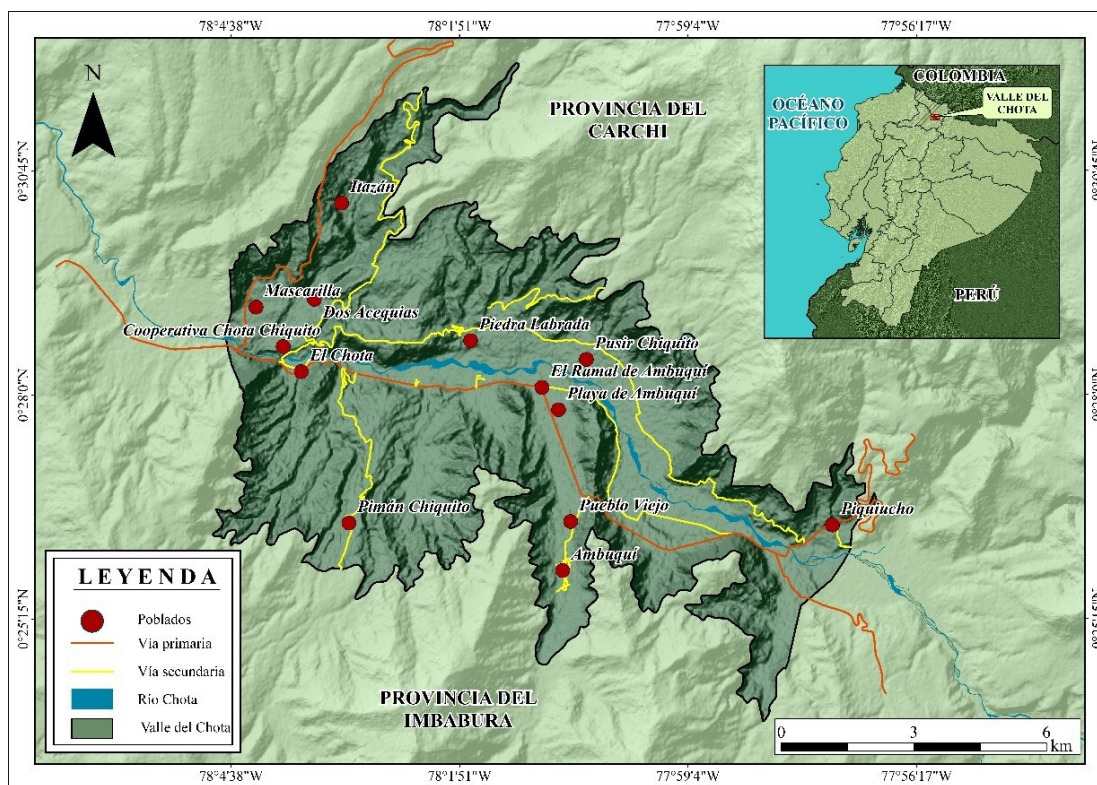


Figura 1. Ubicación del Valle del Chota.

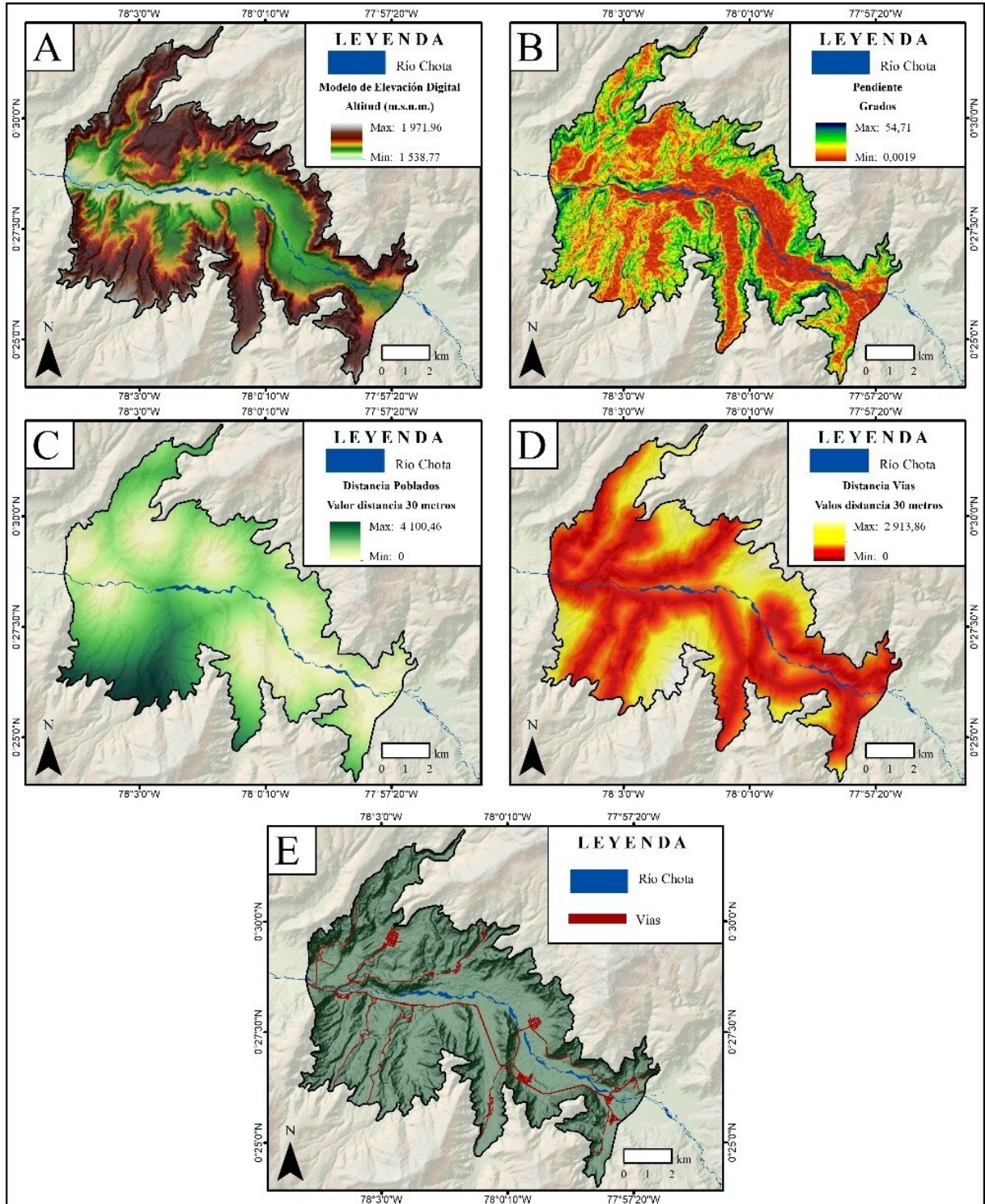


Figura 2. Variables estáticas y dinámicas: a) modelo de elevación DEM y, b) pendientes, c) distancia euclidiana de los poblados, d) distancia euclidiana de vías y, e) vías.

Tabla 1. Características de los archivos geospaciales

Información del ráster	Características
Columnas y filas	502 - 497
Número de bandas	1
Tamaño de píxel	30 m × 30 m
Formato	TIFF
Tipo de píxel	Unsigned integer
Resolución radiométrica del píxel	4 bits

Para el establecimiento del CUS para el año 2022 y 2031, se utilizó la herramienta *Land Change Modeler* (LCM) del software TerrSET 1.0, así se elaboraron los modelos potenciales de transición, predicción y los escenarios de cambio de uso de suelo. En el presente estudio se desarrolló el submodelo denominado “Disturbios” con base en la construcción de tendencias más predominantes de cambio entre las diferentes categorías de cobertura y uso de suelo (Tabla 2).

Tabla 2. Submodelo Disturbios

Transición		Sub-Modelo
De:	Cambio:	
Cultivo de caña	Otros cultivos	Disturbios
Vegetación xerofítica	Caña	
Cultivo de caña	Área sin vegetación	
Otros cultivos	Caña	

Una vez establecido el submodelo, se aplicó la prueba V de Cramer a las variables estáticas y dinámicas que se crearon previamente. Esta prueba sirve para medir la forma en la que están asociadas dos categorías y permitió calcular la relación entre las variables de acuerdo con su efecto (Tabla 3).

Tabla 3. Interpretación de los resultados de la prueba V de Cramer

Tamaño de efecto	Interpretación
$\leq 0,2$	El resultado es débil. Aunque el resultado es estadísticamente significativo, los campos sólo están débilmente asociados.
$0,2 < ES \leq 0,6$	El resultado es moderado. Los campos están asociados moderadamente.
$> 0,6$	El resultado es fuerte. Los campos están fuertemente asociados.

De acuerdo con esta interpretación de la prueba V de Cramer, se obtuvieron variables con una fuerza de concordancia moderada y fuerte, como se observa en la Tabla 4, efectuándose el modelo de transición para el año 2022 y 2031. Finalmente, para conocer el cambio de cobertura y uso del suelo para el año 2022 y 2031, se realizó el análisis de CA-Markov del Software Terrset 1.0. Este modelo se basa en las cadenas de Markov propuestas por el matemático ruso Andrei Markov en 1907 (López Granados et al., 2001).

Tabla 4. Análisis de la prueba V de Cramer

Variabes	Prueba V de Cramer
Pendientes	0,546
Modelo de elevación	0,573
Distancia euclidiana de poblados	0,457
Vías	0,321
Distancia euclidiana vías	0,441
Cultivo de caña a área sin vegetación	0,393
Cultivo de caña a otros cultivos	0,645
Vegetación xerofítica a cultivo de caña	0,498

2.3 Zonificación futura del cultivo de caña de azúcar bajo escenarios de cambio climático al año 2031

En primer lugar, se identificaron los requerimientos agroecológicos del cultivo que fueron empleados para zonificar las áreas óptimas para el desarrollo de la caña de azúcar (Tabla 5). Los requerimientos agroecológicos permiten definir zonas idóneas para cultivos con base a combinaciones de suelo, fisiografía y clima (FAO, 1978), además, contribuyen a zonificar su distribución e identificar los posibles impactos de los cambios climáticos en la viabilidad de la agricultura a futuro. Los cultivos necesitan condiciones óptimas para su desarrollo y estas pueden ser físicas, químicas, topográficas y climáticas, como la temperatura y precipitación que son requerimientos que pueden limitar el crecimiento y desarrollo del cultivo (Ruiz Corral et al., 2013).

Tabla 5. Condiciones agroecológicas del cultivo de caña azúcar

Temperatura media anual	15 a 33 °C
Precipitación media anual	1200 a 1500 mm/año
pH	5,5 a 8
Tipo de suelo recomendable	Francos, franco-arcilloso o franco areno-arcillosos

Fuente: Duarte Álvarez and González Villalba (2019)

Después, los requerimientos agroecológicos de temperatura y precipitación fueron reemplazados por los valores estimados en los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5. Los datos de proyecciones climáticas fueron obtenidos del Informe de Proyecciones Climáticas de Ecuador desarrollado por el Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica (Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE), 2020). Esta información presenta una simulación a futuro, desarrollada mediante un *downscaling dinámico* con una temporalidad 1985-2070. Se simulan las probables condiciones de la temperatura y precipitación bajo dos escenarios climáticos denominados sendas representativas de concentración (RCP 4,5 y RCP 8,5). El escenario RCP 4,5 muestra una probabilidad de que la temperatura sea superior en al menos 2 °C, y el escenario RCP 8,5 presenta un incremento en la temperatura superior a 3 °C (Armenta et al., 2016).

El MAATE proporcionó información de temperatura y precipitación diaria en celdas o píxeles con puntos centrales, y los píxeles utilizados fueron F17C50, F17C51, F17C52, F17C53, F18C50, F18C51, F18C52, F18C53, F19C50, F19C51, F19C52, F19C53; cada píxel cubre un área de 10000 ha. Además, se determinó si existe alguna discrepancia entre los datos *in situ* y los datos comparativos mediante la aplicación del sesgo perceptual (BIAS) y el error medio cuadrático (RMSE) entre los datos pasados disponibles y los datos simulados para cada escenario climático en el periodo 2011-2015 (ecuación 1 y ecuación 2).

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{N} \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{N}} \quad (2)$$

Donde P son los datos pronosticados y O son los datos observados, respectivamente, y N es la cantidad de datos totales.

El BIAS indica la tendencia media que tienen los datos simulados a ser mayor o menor que los datos observados (Gupta et al., 1999). Este estadístico presenta un valor óptimo cuando es igual a cero, lo cual indicaría que la simulación es precisa (Moriassi et al., 2007). El RMSE proporciona una medida del valor medio de los errores del pronóstico, lo que equivale a representar la desviación estándar de los errores del modelo (Righetti et al., 2019). La capacidad predictiva del modelo será mejor cuanto menor sea el valor del RMSE, ya que esto indicaría que las predicciones están más cerca de los valores reales (Arias-Muñoz et al., 2023).

Los resultados obtenidos en el BIAS y el RMSE se analizaron con el fin de verificar la necesidad de corregir los datos climáticos simulados por el Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE) (2020). Después con los datos climáticos simulados y validados para el periodo 2025-2035 se establecieron las zonas aptas para el cultivo de caña en los dos escenarios climáticos RCP 4,5 y RCP 8,5. Este proceso incluyó la interpolación de la temperatura anual y precipitación anual para el periodo 2025-2035 con el método *Spline* en el software ArcGIS 10.8.2 (Figura 3). Finalmente, las zonas óptimas simuladas se compararon con las zonas óptimas actuales.

3 Resultados y Discusión

3.1 Situación actual (año 2022) y proyección futura del cultivo caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) para el año 2031

Si bien el cultivo de caña de azúcar en el valle del Chota no puede desarrollarse en el territorio debido a que no alcanza la precipitación mínima requerida para el desarrollo del mismo, que es de 1200 mm, la clasificación supervisada de la cobertura y uso del suelo muestra que la caña de azúcar se cultiva normalmente. Incluso entre los años 1999 y 2011 se evidenció que el cultivo disminuyó su superficie en un 1,4%.

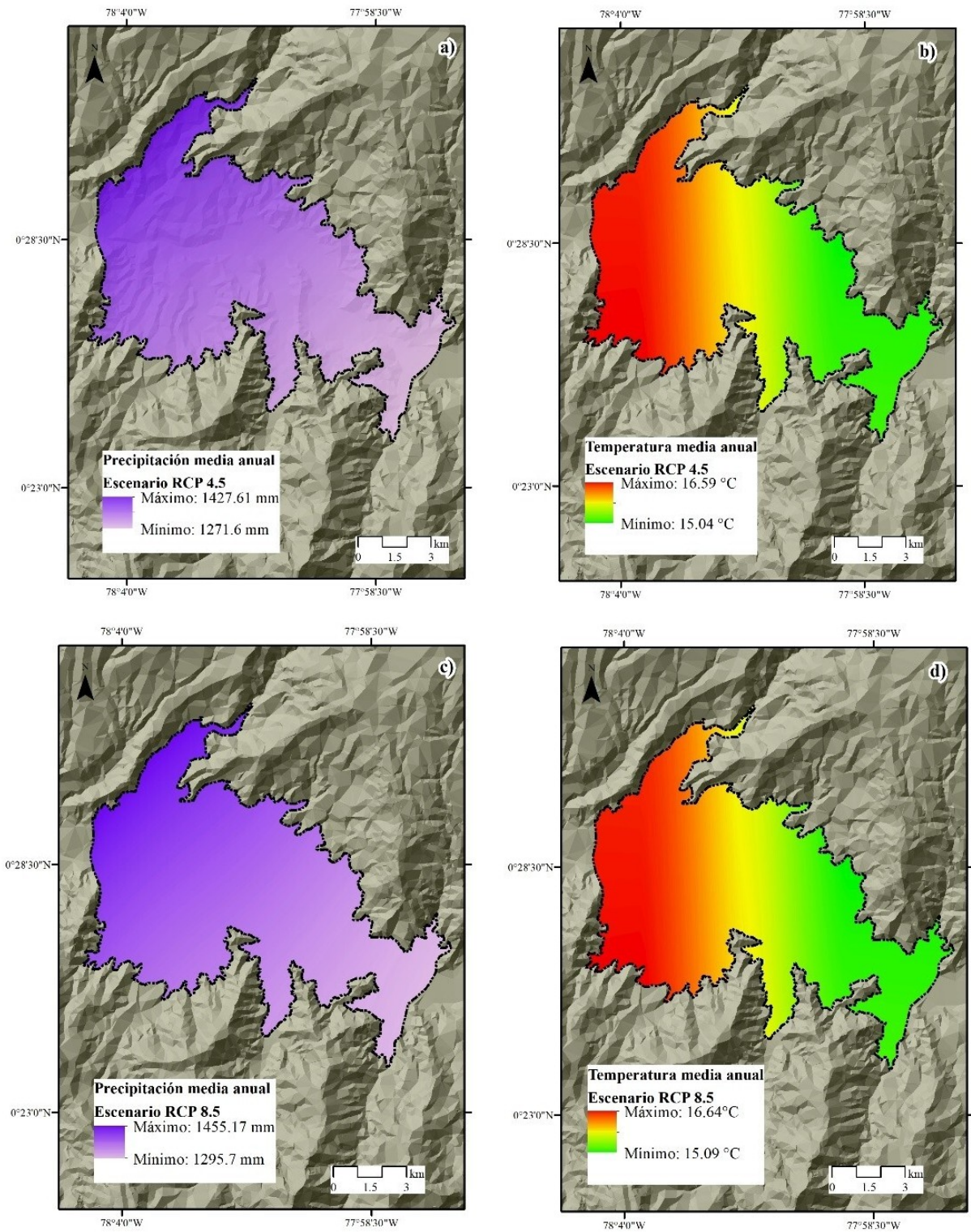


Figura 3. Interpolación de la precipitación y Temperatura a futuro para el periodo 2025-2035. a) Precipitación bajo escenario RCP 4,5, b) Temperatura bajo escenario RCP 4,5, c) Precipitación bajo escenario RCP 4,5, e) Temperatura bajo escenario RCP 8,5.

Para el año 2011 este presentó una superficie de 530,52 ha, representando el 5,7% de la superficie total. De ahí que pese a que no existen las condiciones climáticas para el desarrollo del cultivo, éste se desarrolla de forma permanente en este territorio. De hecho, las necesidades hídricas serían suplidas mediante la aplicación de dos tipos de riego, por goteo, por gravedad y por la adaptabilidad propia de esta especie. Por otra parte, en el año 2022 se observó que 481,52 ha del territorio corresponden a cultivos de caña de azúcar, lo que equivale a 5,21% de la cobertura total, disminuyendo en un 0,49% respecto al año 2011. Actualmente, en el valle del Chota la caña es cultivada por agricultores locales y la cosecha normalmente se vende al Ingenio Azucarero del Norte (IANCEM). Al contrario de la caña de azúcar, otros cultivos y espacios ocupados por los centros poblados son las que más se expandie-

ron, al aumentar su extensión en un 6,91% y 2,66%, respectivamente.

A partir de los datos simulados para el futuro próximo, aún se esperan más cambios; hasta el año 2031, se espera que la caña de azúcar reduzca de 481,52 ha a 410,99 ha respecto al año 2022, lo cual implica una reducción del 14,65%. Esto significa que la caña de azúcar seguirá siendo reemplazada por otros cultivos como el mango, fréjol y pimiento. Como consecuencia, estos y otros cultivos aumentarán sus superficies de 639,38 ha a 681,36 ha (6,57%), llegando a ocupar el 7,37% de la superficie total del valle. También, la superficie de los poblados aumentará alrededor del 10,46% al pasar de 245,80 ha a 271,52 ha, reemplazando principalmente zonas semiáridas del territorio (Figura 4).

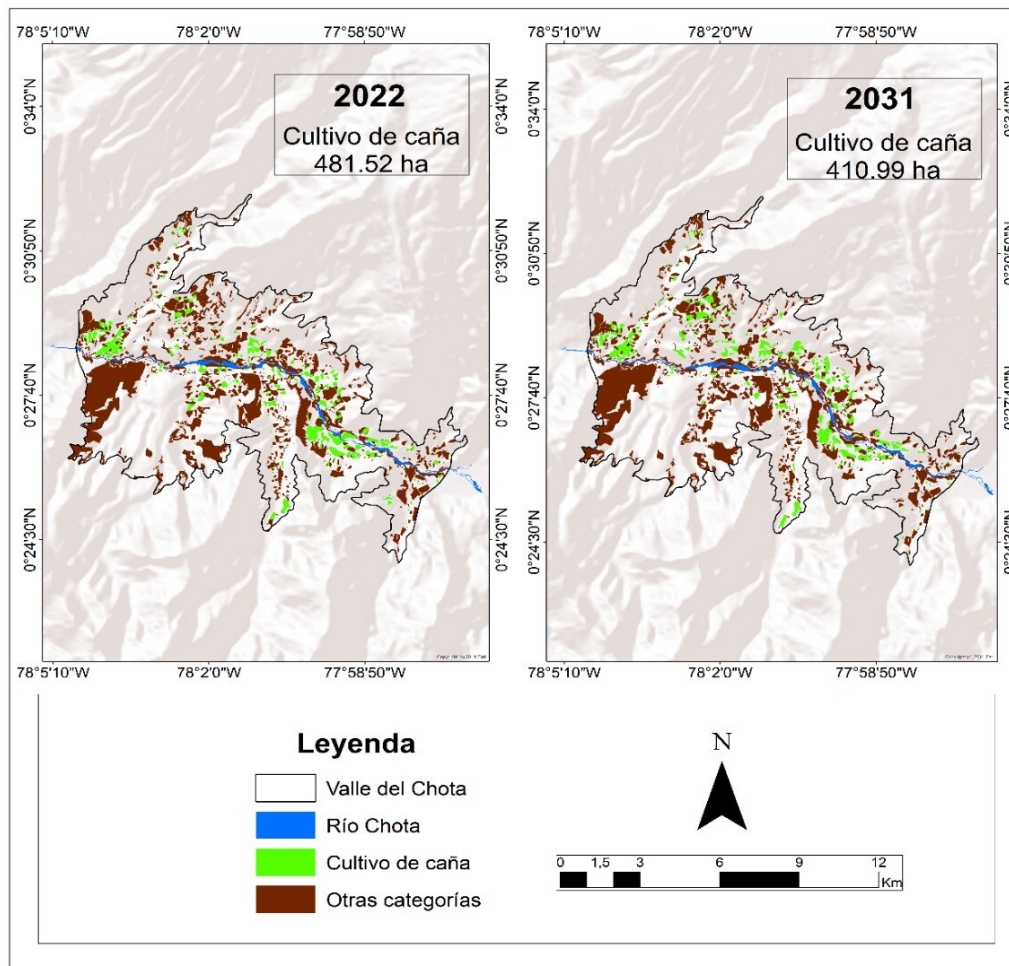


Figura 4. Modelo de cambio de cobertura y uso del suelo del periodo 2022- 2031.

3.2 Zonificación del cultivo de caña de azúcar bajo escenarios de cambio climático para el periodo 2025-2035

En primer lugar, se identificó que no existe la necesidad de corregir los datos climáticos simulados por el Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE) (2020), porque en los dos escenarios climáticos (RCP 4,5 y RCP 8,5) los valores obtenidos para el sesgo perceptual (BIAS) son cercanos a cero y los valores del RMSE para la precipitación oscilan máximo hasta 2 mm, y de la temperatura son cercanos a cero (Tabla 6). Estos valores RMSE son relativamente bajos e indicarían que las predicciones están cerca de los valores reales.

Por consiguiente, para el periodo 2025-2035 se pronostican cambios en precipitación y temperatura que afectarán la producción de la caña de azúcar en el valle del Chota por efectos del cambio climático. Tanto para el escenario RCP 8,5 como para el escenario RCP 4,5 las zonas adecuadas para el desarrollo del cultivo de caña de azúcar se incrementarán en igual proporción, ya que las zonas óptimas pasarán de ser nulas en la actualidad a alcanzar un 70,83% en ambos escenarios climáticos (Tabla 7 y Figura 5). Debido a que en estos escenarios la precipitación media anual fluctuará entre los 1261 mm y 1455 mm y la temperatura media anual oscilará entre 15 y 16,65 °C (Figura 3), con lo cual se alcanzarían los requerimientos climáticos para el óptimo desarrollo del cultivo (Tabla 5). En ese sentido, el cambio climático, de acuerdo a los escenarios analizados, ocasionará que existan zonas óptimas para el desarrollo del cultivo, a diferencia de lo que sucede actualmente. Como consecuencia, se podría desarrollar el cultivo sin la necesidad de recurrir al suministro de agua de riego.

Al igual que otros cultivos, la caña de azúcar no

solo se ve influenciada por las condiciones climáticas que se presenten durante el año agrícola sino también por el interés que presenten los agricultores en cultivarlos (Silva et al., 2014). La disminución de la superficie de la caña de azúcar desde el año 1999 hasta el año 2022 demuestra que el interés de los campesinos del valle por el cultivo ha decrecido poco a poco. Esto pese a la presencia de un ingenio azucarero IANCEM, empresa ubicada en el sector que permite mantener la demanda del producto, condición que según Moreno Izquierdo et al. (2018) permite obtener rendimientos óptimos del cultivo en zonas con condiciones naturales para su producción. Sin embargo, debido a los precios variables y que el ciclo vegetativo y de producción de la caña es de 18 meses, los agricultores manifestaron mediante entrevista que recurren a otros productos con ciclos de producción menores y que presentan mayor recepción en los mercados locales. Espín Díaz (1999) señala que los agricultores del valle prefieren otros productos que a la caña de azúcar por la mayor facilidad de comercialización. De ahí que la caña es reemplazada por cultivos como: mango (*Mangifera indica*), pepinillo (*Cucumis sativus*), pimiento (*Capsicum annuum*) y fréjol (*Phaseolus vulgaris*). Estos cultivos no solo comprenden ciclos más cortos de producción, sino que responden de manera positiva a las condiciones climáticas y edáficas de la zona. Como consecuencia, la superficie del cultivo de caña no aumentará para el año 2031 y se mantendrá la tendencia de sustitución de otros cultivos. Las causas serían la falta de interés y la necesidad de productos en corto tiempo. En general, los estudios realizados en Ecuador han determinado que en los bosques amazónicos (Heredia-R et al., 2021), en la cuenca del río Chambo en el centro-sur del país (Ross et al., 2017) y en la cuenca del río Guayllabamba (Abad-Auquilla, 2020) aumentarán las superficies de cultivos, no obstante, no se define cuáles cultivos reemplazarán a los otros.

Tabla 6. Valores BIAS y RMSE entre los datos históricos y simulados de las variables climáticas precipitación y temperatura

Variable	Escenario climático	BIAS	RMSE
Precipitación	RCP 4,5	-0,10	2,67
	RCP 8,5	-0,25	2,75
Temperatura media	RCP 4,5	-0,41	0,64
	RCP 8,5	-0,45	0,66

Por otro lado, la influencia climática en la producción del cultivo deja en claro que el impacto de la variabilidad climática en la zona aumentará las zonas óptimas para la producción en el valle del Chota, debido a que tanto en los escenarios RCP 4,5 y RCP 8,5 se incrementa la precipitación, alcanzando valores entre 1271,6 mm y 1427,61 mm para el primer escenario y entre 1295,7 mm y 1455,17 mm. Según Aguilar-Rivera et al. (2015) el cultivo de caña requiere como mínimo 1364,23 mm de agua anuales. De ahí que con el cambio climático entre el periodo 2025-2035 se cumplirán las necesidades hídri-

cas del cultivo. En algunas zonas de Brasil también se encontró que el cambio climático mejorará la producción de caña de azúcar pues se incrementará la dotación hídrica (Marin et al., 2013). Autores como Pereira De Souza et al. (2008) demostraron que en ambientes controlados, la concentración de CO₂ reduce la conductancia estomática del cultivo, lo cual aumenta la fotosíntesis. Estos mecanismos fisiológicos no se pueden demostrar en el presente estudio y tampoco revelan las interacciones del CO₂ con otros factores climáticos en condiciones naturales.

Tabla 7. Áreas óptimas para el cultivo de caña de azúcar en el Valle del Chota bajo escenarios de cambio climático para el periodo 2025-2035

Periodo	Escenario	Zona óptima		Zona poco óptima	
		Ha	%	Ha	%
2025-2035	RCP 4,5	6526,27	70,83	2687,91	29,18
2025-2035	RCP 8,5	6526,27	70,83	2687,91	29,18

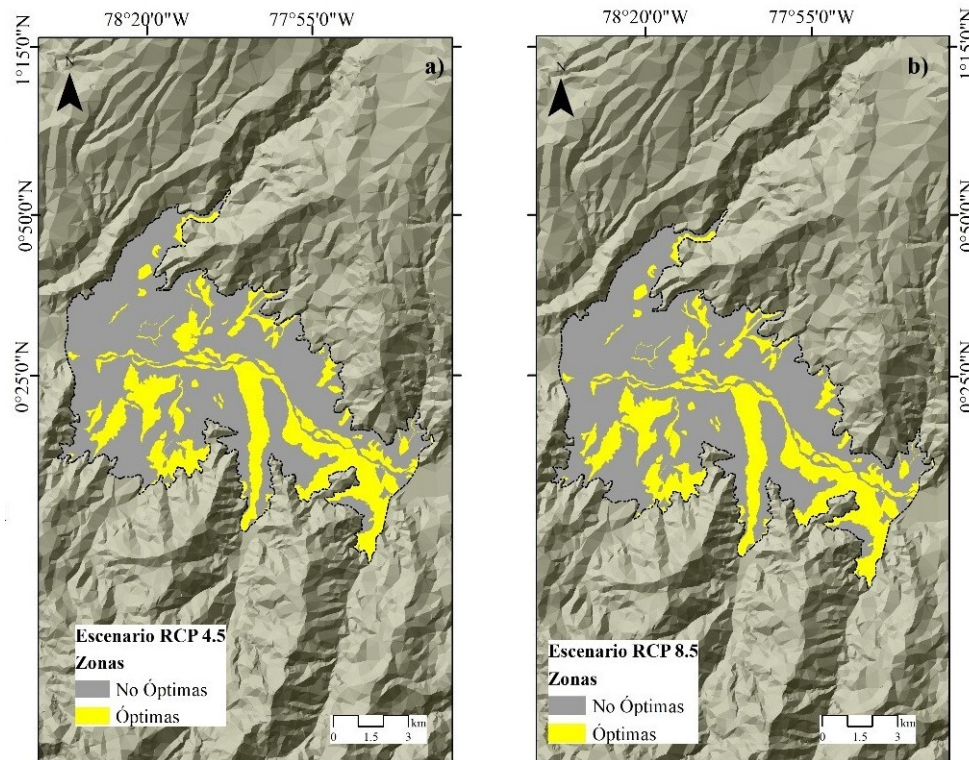


Figura 5. Zonificación del cultivo de caña de azúcar bajo escenarios de cambio climático, a) Periodo 2025-2035 escenario RCP 4,5, b) Periodo 2025-2035 escenario RCP 8,5.

El impacto negativo en el rendimiento del cultivo viene con el aumento de la temperatura. El incremento de temperatura esperado en el valle del Chota a causa del cambio climático se mantendrá entre 15,04 °C y 16,64 °C y no sobrepasará las temperaturas mínimas y máximas del sector que fluctúan entre los 13,2 °C y 26,7 °C. Por lo tanto, no existirá un aumento en el déficit hídrico a diferencia del Caribe, en donde debido al cambio climático existirá un aumento del déficit hídrico y por lo tanto una disminución en el rendimiento del cultivo entre un 20%-40% (Singh and El Maayar, 1998). Asimismo, en el país africano de Suazilandia, el rendimiento de la caña de azúcar también se verá disminuido por efectos del cambio climático en la temperatura, a menos que dentro del modelo futuro se incluya la optimización del agua de riego (Knox et al., 2010). Sin embargo, eventos extremos como las heladas tendrían menos impactos en cultivos como la caña de azúcar, lo cual permitirá que se incrementen los rendimientos de producción (Todd et al., 2015).

Además, debido a la ubicación interandina del valle del Chota, otros efectos del cambio climático tampoco afectarían la producción de la caña de azúcar. Esto a diferencia de Australia, por ejemplo, donde se seguirán incrementando las áreas cultivadas de caña de azúcar en áreas al sur del trópico (Linnenluecke et al., 2020). Sin duda, la producción de la caña de azúcar es vulnerable al cambio climático que ocasiona un aumento en la frecuencia e intensidad de los fenómenos meteorológicos extremos, como la sequía, el calor, las inundaciones y las heladas (Jaiphong et al., 2016; Todd et al., 2015).

Por lo que no se debe descartar que un aumento de fenómenos meteorológicos en el valle del Chota ocasione un aumento de los efectos negativos en la producción de caña de azúcar. Principalmente la sequía, considerando el clima cálido del sector, porque con el cambio climático se agravan sus efectos en el crecimiento y desarrollo de la planta con el aumento del estrés por déficit hídrico (Zhao and Li, 2015). A la vez pueden existir otros limitantes que condicionan los efectos del cambio climático en el valle del Chota, como la disminución de la materia orgánica en el suelo producto del continuo cultivo, ya que según Aguilar-Rivera et al. (2015) esto agrava la susceptibilidad de los suelos a la influencia climática y ambiental.

4 Conclusiones

Pese a que el valle del Chota no dispone de condiciones agroclimáticas óptimas para el desarrollo del cultivo de la caña de azúcar, este se viene desarrollando por años. Sin embargo, a partir del año 1999 hasta el año 2022 ha existido una disminución paulatina del cultivo de caña de azúcar. Esta reducción no ha superado más del 2% de pérdida y ha ocasionado que hasta el 2022 el 5,21 % de la superficie total del valle esté ocupado por el cultivo. El efecto del cambio de uso de suelo proyectado ocasiona que hasta el año 2031 las superficies de caña de azúcar disminuyan en alrededor del 14,65%, respecto a la superficie estimada en el año 2022. El principal motivo por el que se vería reducido el cultivo es por el reemplazo a otros cultivos de ciclo más cortos.

La mayor parte de la caña del valle es producida por los agricultores de la localidad, y aunque existe el Ingenio Azucarero del Norte quien compra su producto, los jornaleros perciben que el tiempo de cosecha es muy largo para su economía, por lo que optan por cosechar otros cultivos cuyo tiempo de cosecha es menor, como es el caso del fréjol y pimiento.

Los efectos del cambio climático en ambos escenarios de concentración RCP 4,5 y RCP 8,5 serán positivos para el cultivo de caña de azúcar, ya que para el periodo futuro 2025-2035 ocasionarán un aumento de las zonas óptimas para el cultivo en igual proporción en alrededor del 70,83% respecto a la situación actual. Esto sucederá porque en ambos escenarios se incrementará la precipitación, sobrepasando los valores hídricos mínimos requeridos por la planta, 1364,23 mm. Por otro lado, el impacto negativo de la temperatura será mínimo, porque no existirá un incremento de las temperatura mínima y máxima en el valle al no sobrepasar los 16 °C y 19 °C.

Finalmente, los resultados identificados en el presente estudio demuestran que para mantener el interés por la producción no es suficiente con tener zonas óptimas para los cultivos. Los posibles efectos benéficos del cambio climático en el valle del Chota no solo aumentarán la disponibilidad hídrica para la caña de azúcar, también podrían propiciar que este cultivo sea reemplazado por otros que despierten mayor interés en los agricultores, sea porque su

ciclo de producción es más corto o porque la rentabilidad para la época sea mejor.

Contribución de los autores

P.A.M.: Conceptualización, curación de datos, análisis formal, metodología, administración del proyecto, recursos, supervisión, validación, visualización, estructura-borrador original, escritura-revisión y edición. E.L.Ch.B.: Curación de datos, investigación, metodología, escritura-borrador original. S.A.P.Y.: Curación de datos, investigación, metodología, escritura-borrador original. G.J.A.: Validación, visualización, supervisión, escritura-revisión y edición. O.R.: Validación, visualización, supervisión, escritura-revisión y edición.

Referencias

- Abad-Auquilla, A. (2020). El cambio de uso de suelo y la utilidad del paisaje periurbano de la cuenca del río Guayllabamba en Ecuador. *Revista de Ciencias Ambientales*, 54(2). Online:https://n9.cl/b0rd7.
- Aguilar-Rivera, N., Algara Siller, M., and Olvera Vargas, L. A. (2015). Gestión del agua como factor limitante de productividad cañera en México. *Revista de Geografía Norte Grande*, 60:135–152. Online:https://n9.cl/df4wu.
- Arias-Muñoz, P., Jácome, G., and Vilela, P. (2022). Analysis of vulnerability to climate change in small cities using livelihood approach. a case of study of Cotacachi, Ecuador. *Acta Geographica Universitatis Comenianae*, 66(1):63–79. Online:https://n9.cl/fohso.
- Arias-Muñoz, P., Saz, M. A., and Escolano Utrilla, S. (2023). Estimación de la erosión del suelo mediante el modelo RUSLE. caso de estudio: Cuenca media alta del río Mira en los Andes de Ecuador. *Investigaciones Geográficas*, 79:207–230. Online:https://n9.cl/fohso.
- Armenta, G., Villa, J., and Jácome, P. (2016). Proyecciones climáticas de precipitación y temperatura para Ecuador, bajo distintos escenarios de cambio climático. Technical report, Ministerio del Ambiente. Online:https://n9.cl/5gs4o.
- Carrascal Jijón, S. L. (2016). Creación de un sujeto político en los esclavizados del Valle del Chota-Ibarra a finales del siglo XVIII. Master's thesis, FLACSO sede Ecuador. Online:https://n9.cl/se0f3y.
- Coronel Feijoo, R. (1991). El valle sangriento 1580-1700: De los señoríos de la coca y el algodón a la hacienda cañera jesuita. Master's thesis, FLACSO sede Ecuador. Online:https://n9.cl/g7n1w.
- Duarte Álvarez, O. and González Villalba, D. (2019). Guía técnica cultivo de caña de azúcar. Technical report, Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Asunción. Online:https://n9.cl/08lda.
- Echeverría, J. and Uribe, M. V. (1981). Papel del Valle del Chota-Mira en la economía interandina de los Andes Septentrionales del Ecuador. *Revista del Instituto Otavaleño de Antropología*, 7(9):23–46. Online:https://n9.cl/g4hpk.
- El Chami, D., Daccache, A., and El Moujabber, M. (2020). What are the impacts of sugarcane production on ecosystem services and human well-being? A review. *Annals of Agricultural Sciences*, 65(2):188–199. Online:https://n9.cl/8x4ki7.
- Espín Díaz, J. (1999). *Estrategias campesinas de sobrevivencia y de reproducción social en la población negra del Valle del Chota, Ecuador*, pages 5–27. CLACSO, Consejo Latinoamericano de Ciencias Sociales. Online:https://n9.cl/uj6v2p.
- FAO (1978). Report on the agro-ecological zones project. 1. Methodology and results for Africa. Rome, Italy. Technical report, Food and Agriculture Organization of the United Nations. Online:https://n9.cl/csyks.
- Gómez-Merino, F., Trejo-Téllez, L., Senties-Herrera, H., Pérez-Sato, J., and Salazar-Ortiz, J. (2015). La caña de azúcar ofrece más que azúcar: Oportunidades de diversificación. *Agroentorno*, 166(18):24–25. Online:https://n9.cl/0v1yz.
- Guerra, A. and Hernández, A. (2012). El cambio climático y el cultivo de la caña de azúcar. In *El cultivo de la caña de azúcar en Guatemala*, pages 479–512. Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático (ICC). Online:https://n9.cl/293fi.

- Gupta, H. V., Sorooshian, S., and Yapo, P. O. (1999). Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. *Journal of Hydrologic Engineering*, 4(2):135–143. Online:https://n9.cl/xjey0.
- Heredia-R, M., Torres, B., Cabrera-Torres, F., Torres, E., Díaz-Ambrona, C. G. H., and Pappalardo, S. E. (2021). Land Use and Land Cover Changes in the Diversity and Life Zone for Uncontacted Indigenous People: Deforestation Hotspots in the Yasuní Biosphere Reserve, Ecuadorian Amazon. *Forests*, 12(11):1539. Online:https://n9.cl/r3qb1.
- Intergovernmental Panel On Climate Change (IPCC) (2023). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge University Press. Online:https://n9.cl/zqau0.
- Jaiphong, T., Tominaga, J., Watanabe, K., Nakabaru, M., Takaragawa, H., Suwa, R., Ueno, M., and Kawamitsu, Y. (2016). Effects of duration and combination of drought and flood conditions on leaf photosynthesis, growth and sugar content in sugarcane. *Plant Production Science*, 19(3):427–437. Online:https://n9.cl/j7l4h.
- Knox, J. W., Díaz, J. R., Nixon, D., and Mkhwanazi, M. (2010). A preliminary assessment of climate change impacts on sugarcane in Swaziland. *Agricultural systems*, 103(2):63–72. Online:https://n9.cl/0mtyz.
- Linnenluecke, M. K., Zhou, C., Smith, T., Thompson, N., and Nucifora, N. (2020). The impact of climate change on the Australian sugarcane industry. *Journal of Cleaner Production*, 246(118974). Online:https://n9.cl/ilrxx.
- López Feldman, A. J. and Hernández Cortés, D. (2016). Cambio climático y agricultura: Una revisión de la literatura con énfasis en América Latina. *El trimestre económico*, 83(332):459–496. Online:https://n9.cl/uwfb8.
- López Granados, E. M., Bocco, G., and Mendoza Cantú, M. E. (2001). Predicción del cambio de cobertura y uso del suelo: El caso de la ciudad de Morelia. *Investigaciones geográficas*, 1(45):39–55. Online:https://n9.cl/nj3js.
- Marin, F. R., Jones, J. W., Singels, A., Royce, F., Assad, E. D., Pellegrino, G. Q., and Justino, F. (2013). Climate change impacts on sugarcane attainable yield in southern Brazil. *Climatic Change*, 117:227–239. Online:https://n9.cl/ja2kz.
- Mena, P. (2001). *Montañas y agua en la Mitad del Mundo. Los Páramos del Ecuador. Particularidades, problemas y perspectivas*, volume 204. Abya Yala. Online:https://n9.cl/jhygv.
- Mendoza, J., Gualle, D., Gómez, P., Ayora, A., Martínez, I., and Cabezas, C. (2005). Progresos en el manejo de plagas en caña de azúcar en Ecuador. Online:https://n9.cl/hzlv8p.
- Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE) (2020). Informe de Proyecciones Climáticas Nacionales. Technical report, Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica.
- Ministerio de Ambiente de Ecuador (2019). Primera contribución determinada a nivel nacional para el acuerdo de París bajo la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático. Technical report, Ministerio de Ambiente de Ecuador. Online:https://n9.cl/eg12n.
- Moraes, M. A. F. D., Oliveira, F. C. R., and Diaz-Chavez, R. A. (2015). Socio-economic impacts of Brazilian sugarcane industry. *Environmental Development*, 16:31–43. Online:https://n9.cl/4wcsrf.
- Moreno Izquierdo, V. J., Lasso Benitez, L. d. P., Reyes Pozo, M. D., Haro Prado, R., and Cruz, G. (2018). Aptitud agroecológica de tres cultivos estratégicos (maíz, arroz y caña de azúcar) en 14 cantones de la cuenca baja del río Guayas. *Pro Sciences: Revista de Producción, Ciencias e Investigación*, 2(13):15–24. Online:https://n9.cl/pcw3y.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., and Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3):885–900. Online:https://n9.cl/vs6ku.
- Organización Internacional del Azúcar (2013). Cambio climático y cultivos azucareros. Technical report, Organización Internacional del Azúcar. Online:https://n9.cl/z4cl7j.
- Ortega Chuquín, J. U. and Arias Muñoz, D. P. (2022). Análisis de los efectos del cambio de uso de suelo en el paisaje del bosque húmedo: Una visión al año 2022 en la cuenca del río Cayapas-Ecuador. *SATHIRI*, 17(1):288–311. Online:https://n9.cl/6nb6r.

- Ortiz Villalva, V. (2011). Valle del Chota: Fútbol, identidad y mercado. Master's thesis, Universidad Andina Simón Bolívar, Sede Ecuador. Online: <https://n9.cl/ykgux>.
- Oviedo, B. and León, G. (2010). Guía de procedimiento para la generación de escenarios de cambio climático regional y local a partir de los modelos globales. Technical report, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Online: <https://n9.cl/k6rsu>.
- Peralta, E., Barrera, V. H., Unda Galarza, J. R., Guala, M., and Tacán, M. (2001). Estudio de la producción, poscosecha, mercadeo y consumo de fréjol arbustivo en el Valle del Chota, Ecuador. Informe de investigación. Technical report, Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP). Online: <https://n9.cl/anv5j>.
- Pereira De Souza, A., Gaspar, M., Alves Da Silva, E., Ulian, E. C., Waclawovsky, A. J., Nishiyama Jr, M. Y., Dos Santos, R. V., Teixeira, M. M., Souza, G. M., and Buckeridge, M. S. (2008). Elevated CO₂ increases photosynthesis, biomass and productivity, and modifies gene expression in sugarcane. *Plant, Cell & Environment*, 31(8):1116–1127. Online: <https://n9.cl/krht5>.
- Pourrut, P. (1983). *Los climas del Ecuador: Fundamentos explicativos*. Ministerio de Agricultura y Ganadería de Ecuador. Online: <https://n9.cl/8qbdb0>.
- Righetti, S. A., Hobouchian, M. P., and García Skabar, Y. (2019). Corrección del BIAS del pronóstico de temperatura mínima y máxima del modelo GFS. Nota Técnica SMN 2017-56. Technical report, Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Online: <https://bit.ly/4jGAwUz>.
- Ross, C., Fildes, S., and Millington, A. (2017). Land use and land-cover change in the Páramo of South-Central Ecuador, 1979–2014. *Land*, 6(3):46. Online: <https://n9.cl/rxhzc>.
- Ruiz Corral, J. A., Medina García, G., González Acuña, I. J., Flores López, H. E., Ramírez Ojeda, G., Ortiz Trejo, C., Byerly Murphy, K. F., and Martínez Parra, R. A. (2013). Requerimientos agroecológicos de cultivos. Technical report, INIFAP. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias-CIRPAC-Campo Experimental Centro Altos de Jalisco. Online: <https://n9.cl/quy25>.
- Sierra, R. (1999). Propuesta preliminar de un sistema de clasificación de vegetación para el Ecuador continental. Technical report, Proyecto Inefan/Gef-Birf y Ecociencia. Online: <https://n9.cl/8pgsm9>.
- Silva, M. d. A., Arantes, M. T., Rhein, A. F. d. L., Gava, G. J. C., and Kolln, O. T. (2014). Potencial produtivo da cana-de-açúcar sob irrigação por gotejamento em função de variedades e ciclos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 18(3):241–249. Online: <https://n9.cl/qn94q>.
- Singh, B. and El Maayar, M. (1998). Potential impacts of greenhouse gas climate change scenarios on sugar cane yields in Trinidad. *Environmental Science, Agricultural and Food Sciences Tropical Agriculture*, 75(3). Online: <https://n9.cl/6a47c3>.
- Som-ard, J., Atzberger, C., Izquierdo-Verdiguier, E., Vuolo, F., and Immitzer, M. (2021). Remote Sensing Applications in sugarcane cultivation: A review. *Remote Sensing*, 13(20):4040. Online: <https://n9.cl/ukbmt>.
- Som-ard, J., Hossain, M. D., Ninsawat, S., and Vee-rachitt, V. (2018). Pre-harvest sugarcane yield estimation using UAV-based RGB images and ground observation. *Sugar Tech*, 20(6):645–657. Online: <https://n9.cl/fgfjv>.
- Todd, J., Glaz, B., Burner, D., and Kimbeng, C. (2015). Historical use of cultivars as parents in Florida and Louisiana sugarcane breeding programs. *International Scholarly Research Notices*. 257417. Online: <https://n9.cl/7pydzs>.
- Winckell, A., Marocco, R., Winter, T., Huttel, C., Pourrut, P., Zebrowski, C., and Sourdat, M. (1997). *Los grandes rasgos del relieve en el Ecuador*, pages 3–13. Centro Ecuatoriano de Investigación Geográfica. Online: <https://n9.cl/cable1>.
- Zhao, D. and Li, Y.-R. (2015). Climate change and sugarcane production: Potential impact and mitigation strategies. *International Journal of Agronomy*. Online: <https://n9.cl/druvyz>.



EFICACIA DE VITRAKVI (LAROTRECTINIB) PARA EL TRATAMIENTO DE TUMORES SÓLIDOS PORTADORES DE GENES NTRK Y EL IMPACTO DE LAS MUTACIONES TRKC

POTENTIAL EFFECTIVENESS OF *VITRAKVI* (LAROTRECTINIB) FOR TREATING TYPES OF SOLID TUMORS CARRYING *NTRK* GENES AND THE IMPACT OF *TRKC* MUTATIONS

Ali Adel Dawood 

Departamento de Anatomía, Escuela de Medicina, Universidad de Mosul, Mosul, Iraq. [https://ror.org/039cf4q47]

*Autor para correspondencia: aad@uomosul.edu.iq

Manuscrito recibido el 20 de diciembre de 2024. Aceptado tras revisión el 27 de marzo de 2025. Publicado el 1 de septiembre de 2025.

Resumen

Vitrakvi es un tratamiento oncológico dirigido a tumores sólidos que presentan fusiones génicas del gen NTRK. Las alteraciones en los genes NTRK constituyen efectos genéticos poco comunes que pueden manifestarse en tumores originados en diversos órganos, incluidos los pulmones, las glándulas tiroideas y el intestino. El objetivo de este estudio fue identificar el sitio de unión de Vitrakvi a las quinasas del receptor de tropomiosina (TRK), así como evaluar los efectos de las mutaciones en TRKC sobre el sitio de fusión. Para obtener la estructura química de Vitrakvi se utilizaron recursos como PubChem, y la estructura tridimensional de las TRK se obtuvo del Protein Data Bank (PDB). El acoplamiento molecular (docking) se llevó a cabo mediante el programa AutoDock Vina. Las simulaciones de acoplamiento, visualización y reconstrucción de las secuencias se realizaron utilizando los programas PyMol, BIOVIA y PyRx. La fusión de Vitrakvi con TRKA y TRKB se ve modificada cuando estas quinasas se combinan con sus respectivos estimuladores (BDGF y NT-4/5). En el caso de TRKC, la unión con Vitrakvi ocurre en la misma cadena que se acopla a su estimulador (NT-3); sin embargo, el sitio de fusión se desplaza respecto al sitio de la triple mutación. Aunque los ensayos clínicos con inhibidores de TRK se encuentran en fases iniciales, existen fundamentos prometedores para la esperanza tanto en pacientes con mutaciones en TRK como en el campo de las terapias dirigidas molecularmente.

Palabras clave: Vitrakvi, TRK, Cáncer sólido, NT-3, Mutación, Docking.

Abstract

Vitrakvi is a cancer treatment that targets solid tumors with NTRK gene fusion. NTRKs are rare genetic effects that can arise in tumors from several organs, including the lungs, thyroid glands, and intestines. This study sought to identify the position at which Vitrakvi binds to tropomyosin receptor kinases (TRKs) as well as the effects of TRKC mutations on the fusion site. Materials and PubChem were used to obtain the chemical structure of Vitrakvi. The 3D structure of TRKs was derived from the PDB. Docking was implemented via AutoDock Vina. Docking, visualization, and sequence reconstruction were completed via the PyMol, BIOVIA, and PyRx programs. The fusion of Vitrakvi with TRKA and TRKB is altered if they are combined with their respective stimulators (BDGF and NT-4/5). TRKC combines with Vitrakvi in the same chain in which it is coupled to its stimulator (NT-3), but the fusion site shifts away from the triple mutation site. Even though clinical trials of TRK inhibitors have just started, there is reason to be hopeful for people with TRK mutations and the field of molecularly targeted medicines.

Keywords: Vitrakvi, TRK, Solid cancer, NT-3, Mutation, Docking.

Forma sugerida de citar: Adel Dawood, A. (2025). Eficacia de Vitrakvi (larotrectinib) para el tratamiento de tumores sólidos portadores de genes NTRK y el impacto de las mutaciones TRKC. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*. Vol. 42(2):106-121. <https://doi.org/10.17163/lgr.n42.2025.07>.

IDs Orcid:

Ali Adel Dawood: <https://orcid.org/0000-0001-8988-5957>

1 Introducción

Vitrakvi, también conocido como larotrectinib, es un inhibidor de la tirosina quinasa que puede utilizarse en el tratamiento de adultos y niños con tumores sólidos que presenten una o más de las siguientes características: fusión génica del receptor tirosina quinasa neurotrófico (NTRK) sin posibilidad de resección quirúrgica adquirida debido al riesgo de morbilidad severa, mutación metastásica de resistencia, ausencia de terapias alternativas satisfactorias o progresión posterior al tratamiento. La FDA autorizó Vitrakvi el 26 de noviembre de 2018. La tasa de respuesta total y los datos sobre la duración de la respuesta fueron utilizados como justificación principal para la aprobación acelerada de larotrectinib (C₂₁H₂₂F₆NO₂) (Loxo Oncology, 2018; US Food and Drug Administration, 2018).

Dado que los carcinomas con fusión del gen de la quinasa del receptor de tropomiosina (TRK) son poco frecuentes, no existe homeostasis en los tejidos tumorales donde las terapias estándar no están disponibles o las terapias recomendadas no logran proporcionar un beneficio clínico documentado y relevante, y además es posible el traslado del paciente; los ensayos clínicos aleatorizados controlados para demostrar mejorías no son viables ni apropiados (Wyatt et al., 1999). Existen numerosos tipos de tumores primarios, cada uno con su historia natural única, lo cual hace inviable la realización de un único estudio aleatorizado que los abarque a todos. Sin embargo, los datos obtenidos en los ensayos clínicos de Vitrakvi fueron consolidados para proporcionar evidencia de su eficacia y seguridad

ante cada solicitud regulatoria (Amatu et al., 2016; Lange and Lo, 2018).

Se ha demostrado que la tasa de respuesta global es un indicador positivo de la eficacia de Vitrakvi en el tratamiento de ciertos grupos tumorales. Es posible observar diferencias cuantitativas en los efectos, dependiendo del tipo de cáncer y de alteraciones genéticas adicionales (Burris et al., 2015).

Vitrakvi se distingue de muchos otros fármacos oncológicos, ya que está diseñado para atacar tumores con una disposición genética específica, independientemente de su localización en el cuerpo. Los datos preliminares demuestran que logra reducir el tamaño tumoral en los pacientes. Además, la rapidez con la que puede lograrse dicha reducción resulta crucial para brindar alivio sintomático a los pacientes (Doebele et al., 2015; Laetsch et al., 2018).

Vitrakvi parece ser seguro, y cualquier efecto adverso potencial se considera mínimo. Por ello, la Agencia Europea de Medicamentos (EMA) concluyó que los beneficios superan los riesgos, y ha aprobado su uso en la Unión Europea (Figura 1).

Vitrakvi en comprimidos o en solución líquida (20 mg/ml) puede administrarse por vía oral en presentaciones de 25 y 100 mg. Si la malignidad se mantiene estable y los efectos secundarios son tolerables, los adultos deben tomar 100 mg dos veces al día. La dosis pediátrica se determina en función del peso corporal (US Food and Drug Administration, 2018).

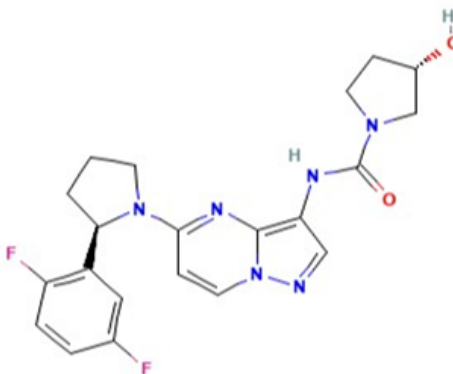


Figura 1. Estructura química del larotrectinib (Vitrakvi).

El objetivo principal de este estudio es evaluar las interacciones moleculares entre Vitrakvi (larotrectinib) y TRKs (TRKA, TRKB y TRKC), centrándose en el impacto de las mutaciones del TRKC en la unión con el fármaco y su eficacia.

1.1 Mecanismo de acción

Las TRK son proteínas que se encuentran en el tejido neural humano. Se activan por acción de las neurotrofinas, lo que les permite desempeñar un papel fundamental en los procesos fisiológicos relacionados con el desarrollo y funcionamiento del sistema nervioso. Los niveles óptimos de desarrollo, diferenciación y supervivencia neuronal están regulados por las quinasas TRKA, TRKB y TRKC, que interactúan dinámicamente con sus autoligandos neurotróficos (Yang et al., 2022). Los genes NTRK1, NTRK2 y NTRK3 codifican respectivamente para TRKA, TRKB y TRKC.

Se han identificado proteínas de fusión como resultado de reordenamientos cromosómicos, como la fusión en marco de estos genes con diversos socios, translocaciones en los dominios TRK, mutaciones en las regiones de unión del TRK, amplificación de NTRK y producción de variantes de empalme del gen TRK. Las quimeras TRK activadas, capaces de inducir tumores, favorecen la proliferación y supervivencia de líneas celulares cancerígenas (Ardini et al., 2016; Tacconelli et al., 2004).

Las fusiones génicas dan lugar a proteínas TRK quiméricas, que pueden poseer actividad quinasa intrínseca o sobre expresar el dominio de la quinasa. Este estado alterado, inducido por mutaciones puntuales, reordenamientos cromosómicos, fusiones génicas o deleciones, provoca la dimerización espontánea e independiente del ligando, activando así la vía de transducción de señales (Arevalo et al., 2000). Hasta la fecha, se ha establecido que todos los mecanismos conocidos de activación oncogénica de TRKA implican la truncación del dominio extracelular (Bové et al., 2021).

Según un estudio, la expresión del gen que codifica el receptor TRK correspondiente a una neurotrofina está regulada por los niveles fisiológicos de dicha neurotrofina *in vivo*, aunque este mecanismo de regulación sólo se observa en una porción de las células que expresan el receptor (Raedler, 2019).

Vitrakvi ha demostrado efectos antitumorales *in vitro* e *in vivo* en modelos con activación constitutiva de las proteínas TRK, ya sea por fusión génica, pérdida del dominio regulador proteico o sobreexpresión de la proteína TRK. Sin embargo, ha mostrado escasa eficacia en líneas celulares con mutaciones puntuales en el dominio quinasa de TRKA, incluidas mutaciones asociadas a resistencia adquirida, como F617L, G623R y G696A, presentes en el dominio de TRKC (Vaishnavi et al., 2013; Hashimoto et al., 2005).

Al igual que otras quinasas de receptores tirosina, las proteínas TRK se activan cuando un ligando se une a su dominio extracelular. Inicialmente fueron clasificadas como proteínas que promueven el crecimiento y la supervivencia de neuronas simpáticas y sensoriales. Las neurotrofinas son proteínas secretadas que actúan como ligandos de las proteínas TRK (Coppola et al., 2004).

Para cada quinasa, los ligandos individuales están representados por las siglas NGF (factor de crecimiento nervioso). El factor de crecimiento derivado del cerebro (BDGF) es el ligando de TRKA, mientras que NT-4/5 y NT-3 lo son para TRKB y TRKC, respectivamente. Cada receptor presenta una región de unión al ligando, una región transmembrana y un dominio intracelular que incluye el dominio quinasa. Este regula etapas avanzadas de la división celular, el crecimiento y ramificación de axones y dendritas, y cumple además funciones no relacionadas exclusivamente con el sistema nervioso (Ferrer et al., 1999; Dwivedi et al., 2003).

La estimulación de TRKA por NGF se ha relacionado con la modulación del dolor, picor e inflamación, además de su función en el desarrollo y mantenimiento de neuronas colinérgicas, simpáticas y sensoriales (Ernst et al., 2009). El TRKB, activado por BDNF, ha demostrado mejorar la plasticidad y supervivencia neuronal. La inhibición terapéutica de TRKB podría ocasionar efectos secundarios indeseables como ataxia, letargo, anhedonia y depresión (Ivanov et al., 2013).

La unión de NGF al receptor TRKA activa la vía Ras/MAPK, lo que estimula la proliferación y el crecimiento celular a través de la vía de señalización de quinasa extracelular (ERK). También se activan otras rutas como fosfolipasa C (PLC)

y fosfatidilinositol-3 quinasa (PI3K) (Nakagawara, 2001; Boulle et al., 2012).

El Neurotrophin-3 (NT-3) es un factor de crecimiento que actúa sobre ciertas células nerviosas, promoviendo la creación y diferenciación de nuevas neuronas y sinapsis, así como la supervivencia de neuronas preexistentes (Chaldakov et al., 2004). El NT-3 estimula la migración celular a través de TRKC. Los inhibidores como K252a y Vitrakvi impiden este efecto. La enfermedad de Hirschsprung, caracterizada por problemas gastrointestinales y ausencia de neuronas en los plexos musculares y la submucosa, se ha relacionado con mutaciones en TRKC que generan proteínas inactivas (Keeler et al., 2017).

Algunas neoplasias con expresión de TRKA pueden tener mejor pronóstico que otras. En el caso del neuroblastoma, la expresión de TRKA se asocia con un pronóstico favorable, ya que la señalización de TRKA y NGF puede ejercer un rol supresor del tumor al inducir diferenciación, detención del crecimiento y angiogénesis en las células tumorales. Por el contrario, la expresión y señalización de TRKC se vinculan con un fenotipo de neuroblastoma más agresivo e invasivo, mientras que una mayor expresión de TRKA se relaciona con características clínicas favorables. Las características clínicas asociadas a TRKC y TRKB son más agresivas, lo que sugiere que este pronóstico alentador se limita a TRKA.

El TRKB favorece la angiogénesis y la resistencia a tratamientos antitumorales al promover señalización autocrina y paracrina en células cancerígenas. Aunque este fenómeno se ha observado principalmente en neuroblastoma, es probable que también ocurra en otros tipos de cáncer. Además, la reordenación del gen NTRK1 en carcinomas papilares de tiroides se asocia con un pronóstico más desfavorable en comparación con los pacientes que no presentan dicha fusión génica. No obstante, la invención y perfeccionamiento de fármacos inhibidores de quinasa, el desarrollo de terapias dirigidas y la escasez de mecanismos clínicos de resistencia podrían hacer que los genes NTRK implicados en procesos malignos sean más tratables (Lange and Lo, 2018; Vaishnavi et al., 2015).

2 Materiales y Métodos

La estructura química de Vitrakvi se recuperó de PubChem y el acoplamiento molecular se realizó utilizando AutoDock Vina. Las estructuras tridimensionales de TRKA, TRKB y TRKC se obtuvieron de la base de datos PDB, y las visualizaciones de acoplamiento se realizaron utilizando el software PyMol, PyRx y BIOVIA. Se construyeron los modelos mutagénicos de las mutaciones TRKC (F617L, G623R y G696A) para analizar los efectos de estas mutaciones en la eficacia de la unión. La estructura química de Vitrakvi se obtuvo de PubChem mediante el identificador CID (46188928).

Se seleccionaron las siguientes estructuras TRK del PDB: TRKA (4F0I), TRKB (4ASZ) y TRKC (6KZD). Un aspecto esencial es que estas quinasa receptoras pueden activarse al combinarse con otros ligandos. Para el acoplamiento molecular se empleó Vitrakvi con estas quinasa combinadas. El factor de crecimiento derivado del cerebro (BDGF) se acopla con TRKA (ID: 1WWW), TRKB con neurotrofina-4/5 (1HCF) y TRKC con neurotrofina-3 (NT-3) (ID: 1B8K).

El acoplamiento molecular entre Vitrakvi y las TRKs se realizó utilizando AutoDock Vina. Para estas tareas se emplearon BIOVIA Discovery Studio 2021 Visualizer y el paquete de Python PyRx. Cada molécula fue visualizada en 3D mediante PyMol. Las tres mutaciones puntuales en TRKC fueron modeladas con el programa molecular PyMol.

3 Resultados

Los resultados del acoplamiento molecular demostraron una alta afinidad de unión entre Vitrakvi y TRKA, TRKB y TRKC de tipo salvaje, con energías de unión de -9,4, -8,8 y -9,9 kcal/mol, respectivamente. Sin embargo, los mutantes de la TRKC mostraron cambios significativos en el sitio de la unión, específicamente en el mutante F617L, lo que indica un posible mecanismo de resistencia a los fármacos. Además, cuando los TRK interactuaban con sus respectivos ligandos (BDGF, NT-4/5 y NT-3), la afinidad de unión de Vitrakvi disminuía, destacando la dinámica competitiva de la unión. Las TRK están compuestas por tres subunidades: TRKA, TRKB y TRKC.

Se llevó a cabo el acoplamiento molecular de estas proteínas con Vitrakvi, y posteriormente se ensamblaron para formar la estructura completa de TRK. La Figura 2 muestra los componentes naturales de las TRK que interactúan con Vitrakvi. La Tabla 1 presenta la energía de interacción (afinidad de unión), así como la desviación cuadrática media (RMSD) de los átomos entre la proteína y el ligando. Cuando la RMSD fue igual a cero, se consideró como la mejor interacción con mayor afinidad.

3.1 Poses de interacción TRKA–Vitrakvi:

Las poses de interacción entre TRKA y Vitrakvi se ilustran en la Figura 3. Los tipos de enlaces y residuos involucrados fueron los siguientes: enlaces de hidrógeno convencionales (ARG591 y SER671), enlaces de hidrógeno con carbono (MET591, ARG592 y GLY516), interacciones con flúor (ARG653), enlaces alquilo y pi-alquilo (LEU515), enlaces pi-sigma (ILE674) y enlaces pi-azufre (MET670).

3.2 Poses de interacción TRKB–Vitrakvi:

Las poses de interacción incluyeron enlaces de hidrógeno convencionales (ASP710), enlaces de hidrógeno con carbono (GLU604 y GLY709), interacciones con flúor (HIS690), interacciones alquilo y pi-alquilo (LEU608, PHE633 e ILE616), e interacciones pi-apilamiento amida (ILE708).

3.3 Poses de interacción TRKC–Vitrakvi:

Las poses de interacción incluyeron enlaces de hidrógeno convencionales (ASP624 y ARG683), enlaces de hidrógeno con carbono (LEU544 y MET620), interacciones alquilo y pi-alquilo (ALA570 y LEU686), interacciones pi-sigma (VAL552) y enlaces pi-pi en forma de T (PHE698).

La actividad antitumoral de Vitrakvi se ha demostrado tanto en modelos tumorales *in vitro* como *in vivo*, específicamente en células cuyas proteínas TRK están activadas de manera constitutiva como resultado de una fusión génica o de la eliminación de la región reguladora de la proteína. Las mutaciones puntuales G623R, G696A y F617L en el dominio de TRKC confieren resistencia a Vitrakvi. Estas alteraciones fueron incorporadas al prototipo de fusión molecular entre TRKC y Vitrakvi. El análisis de los datos de fusión reveló que la región de unión tiene un efecto determinante y que existe una diferencia considerable entre el modelo de fusión tipo salvaje y el modelo mutagénico (Figura 4).

El segundo tipo de acoplamiento molecular ocurre cuando las quinasas y Vitrakvi forman complejos con neurotrofinas (NGF). Cuando TRKA se combina con BDGF, se acopla con Vitrakvi en dos residuos: HIS353 y VAL354. En el caso de TRKB, al interactuar con NT-4/5, se forma una fusión con los residuos ASN325, ILE330, MET354 y ASN355. Como resultado de estas interacciones, se pueden observar diversos tipos de enlaces (Figura 5).

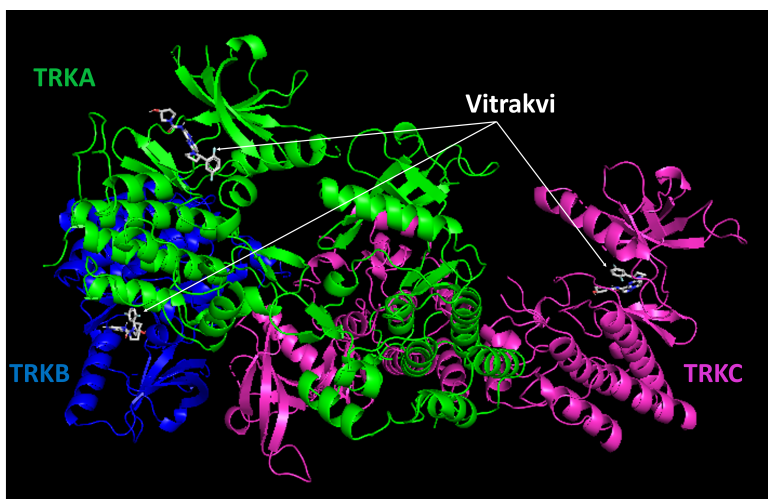


Figura 2. Acople molecular de Vitrakvi con TRKA, TRKB y TRKC normales.

Tabla 1. Los mejores modelos de docking con alta afinidad y grado de RMSD.

Interacción	Afinidad de unión	RMSD/Enlace inferior	RMSD/Enlace superior
<i>TRKA- Vitrakvi</i>	-9,4	0	0
=	-9	37,952	40,5
=	-8,9	31,582	34,651
=	-8,9	38,86	40,942
=	-8,8	2,959	4,916
=	-8,8	20,467	23,779
=	-8,8	3,334	6,68
=	-8,7	39,125	41,494
=	-8,6	34,193	38,61
<i>TRKB- Vitrakvi</i>	-8,8	0	0
=	-8,3	3,949	5,795
=	-8,2	11,7	14,007
=	-8,2	3,016	3,988
=	-8,2	3,818	6,713
=	-8,1	13,205	15,731
=	-8	15,184	17,403
=	-7,9	2,873	4,3
=	-7,5	14,745	17,109
<i>TRKC- Vitrakvi</i>	-9,9	0	0
=	-9,8	60,896	62,482
=	-9,7	61,139	62,664
=	-9,4	59,204	61,71
=	-9,4	3,145	5,358
=	-9,4	4,198	6,607
=	-9,3	2,309	3,632
=	-9,3	3,498	6,198
=	-9,2	4,166	7,191

La Tabla 2 presenta tanto la afinidad de unión como la desviación cuadrática media (RMSD) de los átomos entre el ligando y la proteína. El mejor modelo de interacción es aquel que presenta mayor energía de afinidad electrostática y una RMSD igual a cero.

Cabe destacar que en el caso de TRKC la situación es distinta, pues tiene la capacidad de fusionarse con un ligando (NT-3). En las dos primeras quinasas (TRKA y TRKB), la interacción entre el ligando y la quinasa dependía de cadenas con las que Vitrakvi no se conectaba directamente. En el caso de TRKC, el ligando y Vitrakvi se encuentran fusiona-

dos en la misma cadena.

NT-3 (1B8K) es considerado un inhibidor de la actividad actual de TRKC en presencia de otro fármaco; por tanto, se realizó una operación de acoplamiento (docking) entre TRKC, NT-3 y Vitrakvi, como se ilustra en la Figura 6. El sitio de acoplamiento de TRKC se encuentra en los residuos LYS49, TYR51 y ARG87.

Los resultados de la triple fusión revelaron claramente que el sitio de fusión de Vitrakvi se desplazó respecto a su posición inicial. Las afinidades de unión y los valores de RMSD se presentan en la Tabla 3.

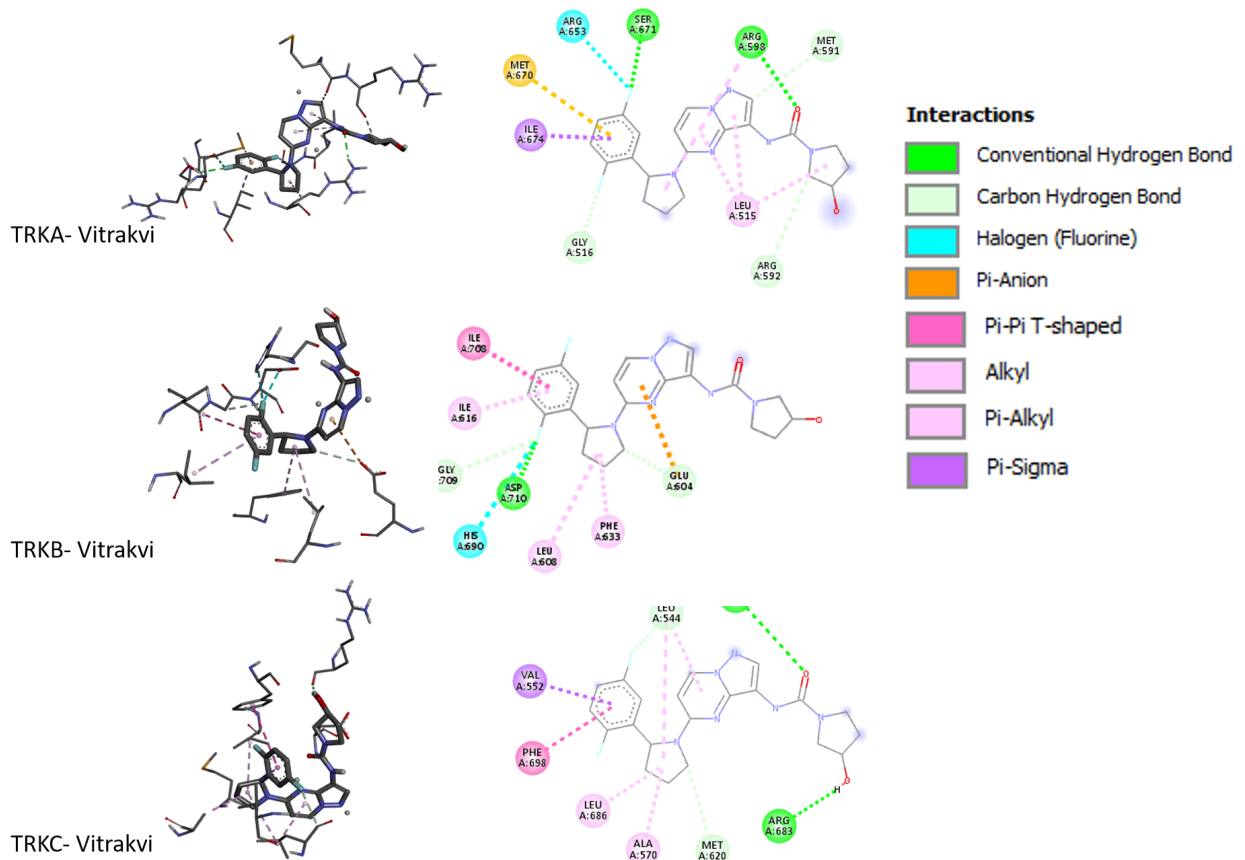


Figura 3. Interacciones de pose entre TRKs y Vitrakvi con una variedad de enlaces.

4 Discusión

Este estudio estudia la relación entre los mecanismos de unión de Vitrakvi y las mutaciones de TRK, aportando ideas sobre el papel del acoplamiento molecular en la predicción de la eficacia y resistencia del fármaco. Los cambios observados en la afinidad y conformación de la unión de los mutantes del TRKC subrayan la importancia de atacar mutaciones específicas para aumentar la eficacia terapéutica de Vitrakvi. El desarrollo de métodos de diagnóstico molecular ha permitido identificar un buen número de alteraciones neoplásicas, como activaciones génicas, mutaciones puntuales, inserciones, deleciones en marco de lectura y ampliificaciones o reordenamientos, lo que ha tenido un impacto significativo en el tratamiento de los tumores sólidos en los últimos años. Este avance ha

provocado un cambio sustancial en el enfoque terapéutico, al permitir utilizar dichas alteraciones como biomarcadores predictivos dentro de la medicina de precisión, orientada a brindar tratamientos personalizados (De Braud et al., 2014; Federman and McDermott, 2019).

Las alteraciones moleculares que dan lugar a proteínas de fusión constitutivamente activas han ganado protagonismo como objetivos terapéuticos en oncología, siendo las proteínas TRK un ejemplo para el tratamiento del cáncer. Además, los métodos de secuenciación de nueva generación resultan útiles para identificar fusiones génicas de manera objetiva, lo que ha contribuido a ampliar la investigación en este campo (Hong et al., 2020).

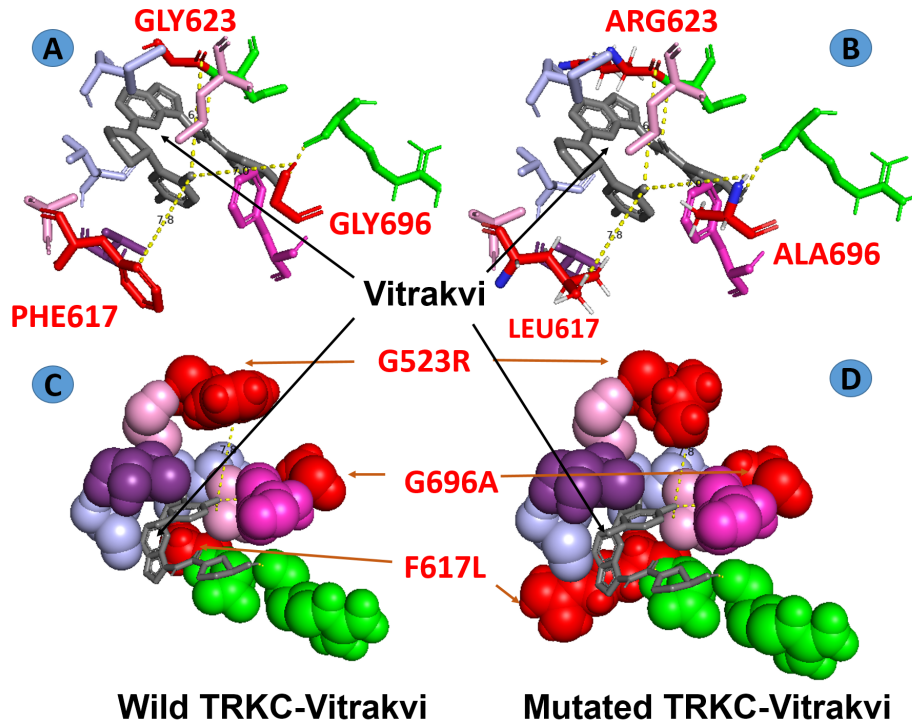


Figura 4. Acoplamiento molecular entre TRKC y Vitrakvi en la proteína TRKC tipo salvaje y mutada. A: Imagen de acoplamiento tipo licorice para la proteína tipo salvaje, que muestra las poses de interacción y los residuos implicados (PHE617, G623 y G696). B: Imagen de acoplamiento tipo licorice para la proteína mutada, que muestra los residuos mutados (LEU617, ARG623 y ALA696). C: Imagen de acoplamiento tipo esferas para la proteína tipo salvaje, destacando en rojo los residuos de interés. D: Resultado del acoplamiento tipo esferas en el modelo mutado, con formas distintas de los residuos en rojo.

La tumorigenicidad se produce cuando diversos tejidos neoplásicos comparten un mismo impulsor tumoral. A medida que aumentan los estudios *tumor-agnósticos*, se hace necesario normalizar los datos de nuevos medicamentos en comparación con tratamientos tradicionales en distintos tipos de tejidos tumorales. Actualmente, no existe un método infalible para medir con precisión la eficacia clínica de estos tratamientos en tipos tumorales individuales. Los datos suelen mostrar comparaciones históricas dentro del mismo paciente a lo largo de distintas líneas terapéuticas, y se espera que varios enfoques metodológicos desempeñen un papel fundamental en la comprensión de estos resultados (Laetsch and Hong, 2021; Cocco et al., 2019).

Tradicionalmente, el cáncer por fusión TRK, se ha tratado mediante combinaciones de quimioterapia, terapias biológicas o inmunoterapia, basadas en la histología tumoral. Vitrakvi es el primer y úni-

co fármaco aprobado en Estados Unidos y Japón para el tratamiento de tumores sólidos en adultos y niños mayores de 12 años con fusión del gen NTRK (Megan et al., 2021). Fue diseñado específicamente como un inhibidor selectivo de RTK competitivo con ATP, con el fin de bloquear la actividad de quinasas fuera del objetivo terapéutico (Drilon et al., 2022).

Vitrakvi demostró ser eficaz en tres ensayos clínicos con 55 pacientes (adultos y niños) con tumores sólidos y fusión del gen NTRK sin mutaciones de resistencia. Vitrakvi mostró una respuesta positiva en el 75% de los casos en pacientes que presentaban cáncer avanzado, sin alternativas terapéuticas eficaces. Estas respuestas fueron duraderas: el 73% de los pacientes respondió durante al menos seis meses y el 39% durante un año o más, al momento del análisis (Doz et al., 2022).

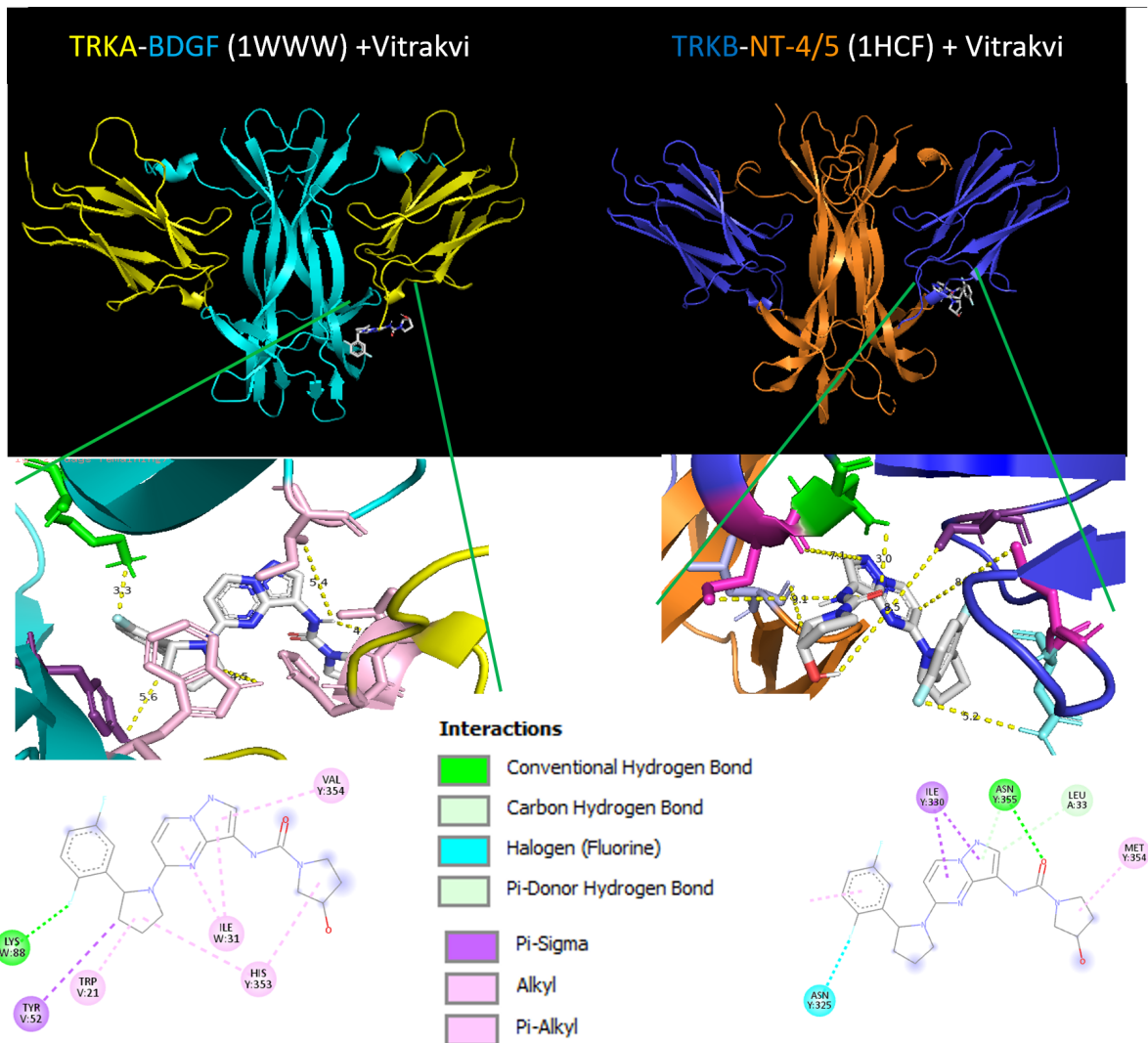


Figura 5. Interacciones moleculares entre quinasas y Vitrakvi cuando se combinan sus ligandos favoritos. Izquierda: TRKA+BDGF (1 WWW). Vitrakvi está en contacto con TRKA en HIS353 y VAL354, mientras que contacta con BDGF en TRP21, ILE33, TYR52, y LYS88. Derecha: TRKB+NT-4/5 (1HCF). Vitrakvi está en contacto con TRKB en ASN325, ILE330, MET354 y ASN355, mientras que NT-4/5 en LEU33.

En el presente estudio se llevó a cabo la fusión completa entre las proteínas TRK. Vitrakvi se acopló (*docking*) a cada una de las quinasas: TRKA, TRKB y TRKC. Se identificaron los modelos óptimos con mayores afinidades de unión cuando el valor de RMSD fue igual a cero: -9,4, -8,8 y -9,9, respectivamente. Las fusiones revelaron varios tipos de enlaces, siendo los enlaces de hidrógeno convencionales los más comunes.

Vitrakvi actúa eficazmente como agente antitumoral, ya sea bloqueando la actividad de las quinasas de fusión o eliminando el dominio regulador proteico en células con sobreexpresión de quinasas, lo que permite combatir el cáncer desde ambas vías. Sin embargo, recientes investigaciones han demostrado que ciertas mutaciones puntuales específicas en TRKC (F617L, G623R y G696A) confieren resistencia al fármaco (Vaishnavi et al., 2013).

Tabla 2. Mejores modelos de acoplamiento molecular con alta afinidad y valores de RMSD entre las estructuras 1WWW y 1HCF en interacción con Vitrakvi.

Interacción	Afinidad de unión	RMSD/Enlace inferior	RMSD/Enlace superior
<i>1WWW- Vitrakvi</i>	-8,9	0	0
=	-8,8	5,023	3,039
=	-8,4	16,653	14,031
=	-8,3	18,73	16,162
=	-8,2	3,112	1,677
=	-8	17,109	14,566
=	-7,7	16,675	13,961
=	-7,7	16,51	13,609
=	-7,7	7,245	4,608
<i>1HCF- Vitrakvi</i>	-7,4	0	0
=	-7,3	14,887	12,102
=	-7,3	37,06	34,562
=	-7,1	2,325	1,746
=	-7,1	29,87	26,509
=	-7	36,186	34,368
=	-7	15,02	12,533
=	-7	22,616	19,816
=	-6,9	36,138	32,961

El acoplamiento entre TRKC tipo salvaje y Vitrakvi se realizó con éxito. Posteriormente, se reconstruyó la estructura tridimensional de TRKC con la triple mutación, observándose diferencias en la configuración del sitio de anclaje entre la quinasa tipo salvaje y la mutante. La alteración más significativa en la forma de la fusión se identificó en el mutante F617L, especialmente en la visualización tipo esfera, donde los residuos presentaron un cambio conformacional distinto que influyó en el resultado de la fusión.

Las quinasas también pueden interactuar con otros factores de crecimiento, motivo por el cual se acopló el receptor no solo con Vitrakvi, sino también con su activador. Se sabe que TRKA se asocia con BDGF, y TRKB con NT-4/5. Se seleccionaron los complejos 1WWW y 1HCF para el acoplamiento con Vitrakvi. Cada acoplamiento generó un conjunto diferente de enlaces. Cuando TRKA y TRKB se acoplaron con Vitrakvi, los valores de afinidad de unión fueron menores que los obtenidos previamente. La energía de unión fue de -8,9 para TRKA-BDGF y de -7,4 para TRKB-NT-4/5. Estos datos demostraron, por primera vez, que el acoplamiento de Vitrakvi con TRKA o TRKB aislados es superior al acoplamiento con TRKA-BDGF o TRKB-NT-4/5.

plamiento de Vitrakvi con TRKA o TRKB aislados es superior al acoplamiento con TRKA-BDGF o TRKB-NT-4/5.

En el presente trabajo, la unión de Vitrakvi a TRKA o TRKB por separado difirió del sitio de acoplamiento observado cuando ambas quinasas se combinaron con sus respectivos ligandos (BDGF o NT-4/5).

El caso de TRKC es diferente, ya que el sitio donde ocurren las mutaciones se encuentra en la misma región de fusión con Vitrakvi. A diferencia de TRKA y TRKB, el activador de TRKC, conocido como NT-3, se combina en la misma cadena. La Figura 5 muestra que en la asociación de Vitrakvi con TRKC, el sitio de fusión se desplazó hacia la dirección de NT-3, alejándose de la zona donde se localizan las mutaciones. Esto ayuda a explicar el cambio en la dirección de la intercalación desde su sitio original de acoplamiento cuando ocurren mutaciones triples. Además, la energía de unión entre TRKC combinado con NT-3 y Vitrakvi fue mayor que cuando se analizó TRKC por separado.

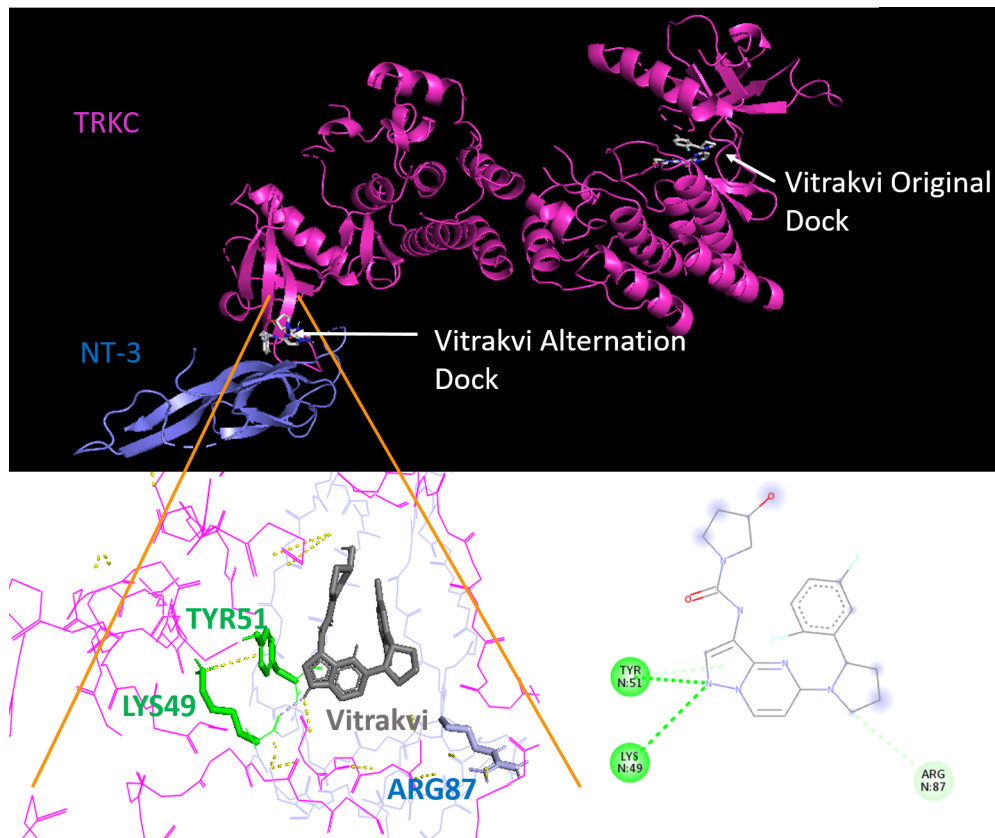


Figura 6. Cambios en la interacción molecular respecto a la posición original de acoplamiento entre TRKC y Vitrakvi (a la derecha). A la izquierda se muestra la nueva fusión de Vitrakvi con TRKC cuando la quinasa se combina con NT-3 (1B8K). Se identifican dos enlaces de hidrógeno convencionales en los residuos LYS49 y TYR51 de TRKC. También se observan enlaces carbono-hidrógeno en el residuo ARG87 de TRKC.

El Neurotrophin-3 se expresa tanto en humanos como en roedores, así como su receptor correspondiente TRKC. El nivel de expresión de NT-3 disminuye con la edad. La expresión de NT-3 se detecta principalmente en vasos sanguíneos encargados de irrigar tejido adiposo, mientras que TRKC se expresa de forma equivalente en adipocitos aislados y en tejido completo (Bové et al., 2021).

Vitrakvi está aprobado para personas con tumores sólidos que presentan fusión del gen NTRK, y no existen tratamientos alternativos adecuados para su condición metastásica en progresión. Este fármaco representa un avance innovador tanto para la medicina de precisión como para el desarrollo de fármacos oncológicos, ya que se trata de una terapia independiente del tipo de tejido tumoral, que ha demostrado ser segura y con efectos duraderos en esta población de pacientes (Vaishnavi et al., 2013).

Dado que la sobreexpresión de los genes NTRK contribuye a la carcinogénesis y progresión tumoral, los inhibidores de TRK pueden ser beneficiosos para tratar neoplasias con señalización anómala del sistema NTRK. Las mutaciones en estos genes se han detectado en diversos tipos de tejidos tumorales, por lo que se considera que la investigación y desarrollo de inhibidores TRK representa una vía terapéutica prometedora y eficaz para diversos tipos de cáncer (Lange and Lo, 2018).

No obstante, el desarrollo y perfeccionamiento de fármacos inhibidores de quinasas, junto con la identificación de objetivos oncogénicos y la relativa escasez de mecanismos clínicos de resistencia, podrían contribuir significativamente a controlar de manera más efectiva los cánceres asociados con alteraciones en los genes NTRK.

Tabla 3. Mejores modelos de acoplamiento molecular con alta afinidad de unión y valores de RMSD entre TRKC + NT-3 y Vitrakvi.

Interacción	Afinidad de unión	RMSD/Enlace inferior	RMSD/Enlace superior
(TRKC+NT-3)- Vitrakvi	-7,3	0	0
=	-7	5,217	2,451
=	-6,9	5,903	2,368
=	-6,8	6,165	3,599
=	-6,7	4,974	2,856
=	-6,7	5,678	2,898
=	-6,7	6,751	3,876
=	-6,5	18,278	16,808
=	-6,5	1,994	1,759

5 Conclusiones

Al conectar el objetivo de la investigación, la metodología y los resultados, este estudio destaca el potencial de las simulaciones de acoplamiento molecular para desentrañar los mecanismos de interacción y resistencia de fármacos, hallando el camino para terapias más efectivas en oncología de precisión. Se ha identificado que múltiples tipos de cáncer están relacionados con una señalización anormal de las proteínas TRK. La identificación de genes NTRK mutados como factores oncogénicos ha abierto nuevas oportunidades de intervención terapéutica. Fármacos como Vitrakvi, que han demostrado resultados clínicos prometedores, podrían hacer que el objetivo molecular tenga más peso que el órgano tumoral al decidir un tratamiento.

Los avances técnicos han permitido disponer de más información sobre reordenamientos genéticos, lo cual favorece una planificación más precisa de las intervenciones terapéuticas dirigidas a factores oncogénicos. A pesar de que los ensayos clínicos con inhibidores TRK están en fases iniciales, existe un fundamento alentador tanto para los pacientes con mutaciones TRK como para el campo de los medicamentos dirigidos molecularmente.

Contribución de los autores

A.A.D.: Conceptualización, análisis formal, investigación, validación, visualización, redacción-borrador original, redacción-revisión y edición.

Referencias

- Amatu, A., Sartore-Bianchi, A., and Siena, S. (2016). Ntrk gene fusions as novel targets of cancer therapy across multiple tumor types. *ESMO Open*, 1(2):e000023. Online:https://n9.cl/zhwvo.
- Ardini, E., Menichincheri, M., Banfi, P., Bosotti, R., De Ponti, C., Pulci, R., Ballinari, D., Ciomei, M., Texido, G., Degrassi, A., Avanzi, N., Amboldi, N., Saccardo, M. B., Casero, D., Orsini, P., Bandiera, T., Mologni, L., Anderson, D., Wei, G., Harris, J., Vernier, J.-M., Li, G., Felder, E., Donati, D., Isacchi, A., Pesenti, E., Magnaghi, P., and Galvani, A. (2016). Entrectinib, a pan-trk, ros1, and alk inhibitor with activity in multiple molecularly defined cancer indications. *Molecular Cancer Therapeutics*, 15(4):628–639. Online:https://n9.cl/cv2zja.
- Arevalo, J. C., Conde, B., Hempstead, B. L., Chao, M. V., Martin-Zanca, D., and Perez, P. (2000). Trka immunoglobulin-like ligand binding domains inhibit spontaneous activation of the receptor. *Molecular and Cellular Biology*, 20(16):5908–5916. Online:https://n9.cl/iyxio.
- Boulle, F., Kenis, G., Cazorla, M., Hamon, M., Steinbusch, H. W. M., Lanfumey, L., and van den Hove, D. L. A. (2012). Trkb inhibition as a therapeutic target for cns-related disorders. *Progress in Neurobiology*, 98(2):197–206. Online:https://n9.cl/3fbuyr.
- Bové, M., Monto, F., Guillem-Llobat, P., Ivorra, M. D., Noguera, M. A., Zambrano, A., Sirerol-Piquer, M. S., Requena, A. C., García-Alonso, M., Tejerina, T., Real, J. T., Farinàs, I., and D'Ocon, P.

- (2021). Nt3/trkc pathway modulates the expression of ucp-1 and adipocyte size in human and rodent adipose tissue. *Frontiers in Endocrinology*, 12:630097. Online:https://n9.cl/3w0dm0.
- Burris, H. A., Shaw, A. T., Bauer, T. M., Farago, A. F., Doebele, R. C., Smith, S., Nanda, N., Cruickshank, S., Low, J. A., and Brose, M. S. (2015). Pharmacokinetics (pk) of loxo-101 during the first-in-human phase i study in patients with advanced solid tumors: interim update. *Cancer Research*, 75. Online:https://n9.cl/i2rq41.
- Chaldakov, G. N., Fiore, M., Stankulov, I. S., Mani, L., Hristova, M. G., Antonelli, A., Ghenev, P. I., and Aloe, L. (2004). Neurotrophin presence in human coronary atherosclerosis and metabolic syndrome: a role for ngf and bdnf in cardiovascular disease? *Progress in Brain Research*, 146:279–289. Online:https://n9.cl/69mra.
- Cocco, E., Schram, A. M., Kulick, A., Misale, S., Won, H. H., Yaeger, R., Razavi, P., Ptashkin, R., Hechtman, J. F., Toska, E., Cownie, J., Somwar, R., Shifman, S., Mattar, M., Selçuklu, S. D., Samoila, A., Guzman, S., Tuch, B. B., Ebata, K., de Stanchina, E., Nagy, R. J., Lanman, R. B., Houck-Loomis, B., Patel, J. A., Berger, M. F., Ladanyi, M., Hyman, D. M., Drilon, A., and Scaltriti, M. (2019). Resistance to trk inhibition mediated by convergent mapk pathway activation. *Nature Medicine*, 25:1422–1427. Online:https://n9.cl/fxa8g.
- Coppola, V., Barrick, C. A., Southon, E. A., Celeste, A., Wang, K., Chen, B., Haddad, E.-B., Yin, J., Nussenzweig, A., Subramaniam, A., and Tessarollo, L. (2004). Ablation of trka function in the immune system causes b-cell abnormalities. *Development*, 131(20):5185–5195. Online:https://n9.cl/986yc.
- De Braud, F. G. M., Pilla, L., Niger, M., Damian, S., Bardazza, B., Martinetti, A., Pelosi, G., Marrapese, G., Palmer, L., Cerea, G., Valtorta, E., Veronese, S., Sartore-Bianchi, A., Ardini, E., Martignoni, M., Isacchi, A., Pearson, P., Luo, D., Freddo, J. L., and Siena, S. (2014). Rxdx-101, an oral pan-trk, ros1, and alk inhibitor, in patients with advanced solid tumors with relevant molecular alterations. *Annals of Oncology*, 25(Suppl 4):iv146–iv164. Online:https://n9.cl/o3k0f.
- Doebele, R. C., Davis, L. E., Vaishnavi, A., Le, A. T., Estrada-Bernal, A., Keysar, S., Jimeno, A., Varella-Garcia, M., Aisner, D. L., Li, Y., Stephens, P. J., Morosini, D., Tuch, B. B., Fernandes, M., Nanda, N., and Low, J. A. (2015). An oncogenic ntrk fusion in a patient with soft-tissue sarcoma with response to the tropomyosin-related kinase inhibitor loxo-101. *Cancer Discovery*, 5(10):1049–1057. Online:https://n9.cl/c8uuuj.
- Doz, F., van Tilburg, C. M., Geoerger, B., Højgaard, M., Øra, I., Boni, V., Capra, M., Chisholm, J., Chung, H. C., DuBois, S. G., Gallego-Melcon, S., Gerber, N. U., Goto, H., Grilley-Olson, J. E., Hansford, J. R., Hong, D. S., Italiano, A., Kang, H. J., Nysom, K., Thorwarth, A., Stefanowicz, J., Tahara, M., Ziegler, D. S., Gavrilovic, I. T., Norenberg, R., Dima, L., De La Cuesta, E., Laetsch, T. W., Drilon, A., and Perreault, S. (2022). Efficacy and safety of larotrectinib in trk fusion-positive primary central nervous system tumors. *Neuro-Oncology*, 24(6):997–1007. Online:https://n9.cl/m142w.
- Drilon, A., Tan, D. S. W., Lassen, U. N., Leyvraz, S., Liu, Y., Patel, J. D., Rosen, L., Solomon, B., Norenberg, R., Dima, L., Brega, N., Shen, L., Moreno, V., Kummar, S., and Lin, J. J. (2022). Efficacy and safety of larotrectinib in patients with tropomyosin receptor kinase fusion-positive lung cancers. *JCO Precision Oncology*, 6:e2100418. Online:https://n9.cl/6xpa3.
- Dwivedi, Y., Rizavi, H. S., Conley, R. R., Roberts, R. C., Tammaing, C. A., and Pandey, G. N. (2003). Altered gene expression of brain-derived neurotrophic factor and receptor tyrosine kinase b in postmortem brain of suicide subjects. *Archives of General Psychiatry*, 60(8):804–815. Online:https://n9.cl/i9jwmi.
- Ernst, C., Deleva, V., Deng, X., Sequeira, A., Pomarenski, A., Klempan, T., Ernst, N., Quirion, R., Gratton, A., Szyf, M., and Turecki, G. (2009). Alternative splicing, methylation state, and expression profile of tropomyosin-related kinase b in the frontal cortex of suicide completers. *Archives of General Psychiatry*, 66(1):22–32. Online:https://n9.cl/bt3kxm.
- Federman, N. and McDermott, R. (2019). Larotrectinib, a highly selective tropomyosin receptor kinase (trk) inhibitor for the treatment of trk fusion cancer. *Expert Review of Clinical Pharmacology*, 12(10):931–939. Online:https://n9.cl/yl7v2.







- Ferrer, I., Marín, C., Rey, M. J., Ribalta, T., Goutan, E., Blanco, R., Tolosa, E., and Martí, E. (1999). Bdnf and full-length and truncated trkb expression in alzheimer disease. implications in therapeutic strategies. *Journal of Neuropathology and Experimental Neurology*, 58(7):729–739. Online:https://n9.cl/5qmtqj.
- Hashimoto, T., Bergen, S. E., Nguyen, Q. L., Xu, B., Monteggia, L. M., Pierri, J. N., Sun, Z., Sampson, A. R., and Lewis, D. A. (2005). Relationship of brain-derived neurotrophic factor and its receptor trkb to altered inhibitory prefrontal circuitry in schizophrenia. *Journal of Neuroscience*, 25(2):372–383. Online:https://n9.cl/wji2t.
- Hong, D. S., DuBois, S. G., Kummar, S., Farago, A. F., Albert, C. M., Rohrberg, K. S., van Tilburg, C. M., Nagasubramanian, R., Berlin, J. D., Federman, N., Mascarenhas, L., Georger, B., Dowlati, A., Pappo, A. S., Bielack, S., Doz, F., McDermott, R., Patel, J. D., Schilder, R. J., Tahara, M., Pfister, S. M., Witt, O., Ladanyi, M., Rudzinski, E. R., Nanda, S., Childs, B. H., Laetsch, T. W., Hyman, D. M., and Drilon, A. (2020). Larotrectinib in patients with trk fusion-positive solid tumors: a pooled analysis of three phase 1/2 clinical trials. *The Lancet Oncology*, 21(4):531–540. Online:https://n9.cl/1zmfq.
- Ivanov, S. V., Panaccione, A., Brown, B., Guo, Y., Moskaluk, C. A., Wick, M. J., Brown, J. L., Ivanova, A. V., Issaeva, N., El-Naggar, A. K., and Yarbrough, W. G. (2013). Trkc signaling is activated in adenoid cystic carcinoma and requires nt-3 to stimulate invasive behavior. *Oncogene*, 32:3698–3710. Online:https://n9.cl/nzp7h.
- Keeler, A. B., Suo, D., Park, J., and Deppmann, C. D. (2017). Delineating neurotrophin-3 dependent signaling pathways underlying sympathetic axon growth along intermediate targets. *Molecular and Cellular Neuroscience*, 82:66–75. Online:https://n9.cl/r0f7qo.
- Laetsch, T. W., DuBois, S. G., Mascarenhas, L., Turpin, B., Federman, N., Albert, C. M., Nagasubramanian, R., Davis, J. L., Rudzinski, E., Feraco, A. M., Tuch, B. B., Ebata, K. T., Reynolds, M., Smith, S., Cruickshank, S., Cox, M. C., Pappo, A. S., and Hawkins, D. S. (2018). Larotrectinib for pediatric solid tumors harboring ntrk gene fusions: phase 1 results from a multicenter, open-label, phase 1/2 study. *Lancet Oncology*, 19(5):705–714. Online:https://n9.cl/19bte.
- Laetsch, T. W. and Hong, D. S. (2021). Tropomyosin receptor kinase inhibitors for the treatment of trk fusion cancer. *Clinical Cancer Research*, 27(8):4974–4982. Online:https://n9.cl/s3fby.
- Lange, A. M. and Lo, H. W. (2018). Inhibiting trk proteins in clinical cancer therapy. *Cancers (Basel)*, 10(4):105. Online:https://n9.cl/nqv6a.
- Loxo Oncology (2018). *Vitrakvi (larotrectinib) capsules/oral solution [prescribing information]*. Loxo Oncology, Stamford, CT.
- Megan, P., Karen, K., Erika, W., Louis, J., Evelyn, S., and Brian, C. (2021). Transforming approaches to treating trk fusion cancer: historical comparison of larotrectinib and histology-specific therapies. *Current Medical Research and Opinion*, 37(1):59–70. Online:https://n9.cl/ht99gl.
- Nakagawara, A. (2001). Trk receptor tyrosine kinases: a bridge between cancer and neural development. *Cancer Letters*, 169(2):107–114. Online:https://n9.cl/82jn0w.
- Raedler, L. (2019). Vitrakvi (larotrectinib) first trk inhibitor approved by the fda for solid tumors based on a genetic mutation. *Oncology Guideline FDA Application*, 12:43–45. Online:https://n9.cl/z2g5f.
- Tacconelli, A., Farina, A. R., Cappabianca, L., DeSantis, G., Tessitore, A., Vetuschi, A., Sferra, R., Rucci, N., Argenti, B., Screpanti, I., Gulino, A., and Mackay, A. R. (2004). Trka alternative splicing: A regulated tumor-promoting switch in human neuroblastoma. *Cancer Cell*, 6(4):347–360. Online:https://n9.cl/po2tk.
- US Food and Drug Administration (2018). Fda approves an oncology drug that targets a key genetic driver of cancer, rather than a specific type of tumor. Online: https://n9.cl/5siyhh.
- Vaishnavi, A., Capelletti, M., Le, A. T., Kako, S., Butaney, M., Ercan, D., Mahale, S., Davies, K. D., Aisner, D. L., Pilling, A. B., Berge, E. M., Kim, J., Sasaki, H., Park, S., Kryukov, G., Garraway, L. A., Hammerman, P. S., Haas, J., Andrews, S. W., Lipson, D., Stephens, P. J., Miller, V. A., Varella-Garcia, M., Jänne, P. A., and Doebele, R. C. (2013).

- Oncogenic and drug-sensitive ntrk1 rearrangements in lung cancer. *Nature Medicine*, 19:1469–1472. Online:<https://n9.cl/qgzy0l>.
- Vaishnavi, A., Le, A. T., and Doebele, R. C. (2015). Trking down an old oncogene in a new era of targeted therapy. *Cancer Discovery*, 5(1):25–34. Online:<https://n9.cl/9y4rq>.
- Wyatt, S., Middleton, G., Doxakis, E., and Davies, A. M. (1999). Selective regulation of trkc expression by nt3 in the developing peripheral nervous system. *Journal of Neuroscience*, 19(15):6559–6570. Online:<https://n9.cl/67xzy>.
- Yang, J. C. H., Brose, M. S., Castro, G., Kim, E. S., Lassen, U. N., Leyvraz, S., Pappo, A., López-Ríos, F., Reeves, J. A., Fellous, M., Penault-Llorca, F., Rudzinski, E. R., Tabatabai, G., Vassal, G., Drilon, A., and Trent, J. (2022). Rationale and design of on-trk: a novel prospective noninterventional study in patients with trk fusion cancer treated with larotrectinib. *BMC Cancer*, 22:625. Online:<https://n9.cl/c3ldty>.



META-ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN CIENTÍFICA SOBRE LA ESPECIE *CARLUDOVICA PALMATA* RUÍZ & PAVÓN

META-ANALYSIS OF SCIENTIFIC INFORMATION ON THE SPECIES *CARLUDOVICA PALMATA* RUÍZ & PAVÓN

Lucero Alejandra Perera-Hau¹, Alberto Santillán-Fernández², Norman
Aguilar-Gallegos³, Juan Carlos Alamilla-Magaña¹, Tomas Augusto
Gonzales-Estrada¹ y José Humberto Caamal-Velázquez*¹

¹BIOSAT, Colegio de Postgraduados Campus Campeche. Código Postal 24400, Champotón, Campeche, México. [<https://ror.org/00qfnf017>]

²IxM CONAHCyT. Colegio de Postgraduados Campus Campeche. Código Postal 24400, Champotón, Campeche, México. [<https://ror.org/02ge9fk48>]

³Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales, Universidad Panamericana, Álvaro del Portillo 49, Zapopan 45010, Jalisco, México. [<https://ror.org/01n1q0h77>]

*Autor para correspondencia: hcaamal@colpos.mx

Manuscrito recibido el 10 de agosto de 2023. Aceptado, tras revisión el 10 de mayo de 2024. Publicado el 1 de septiembre de 2025.

Resumen

Carludovica palmata Ruíz & Pavón es una especie de palma con amplio potencial en la manufactura de artesanías, pero con limitado manejo agrícola. Es originaria de Ecuador, y en México solo se distribuye en Campeche al sureste del país; sirve como materia prima para la fabricación de los sombreros de palma jipi. El objetivo de este trabajo es analizar la evolución espacio-temporal de la investigación publicada en artículos científicos donde la especie fue objeto de estudio, mediante técnicas bibliométricas para identificar áreas de oportunidad en investigación que han sido poco desarrolladas. Se encontraron 78 textos de 1961 a 2022 cuya evolución espacio-temporal mostró un crecimiento exponencial que se concentró en países de América: Colombia (38), México (11) y Ecuador (8). Los temas de investigación más recurrentes fueron: botánica de la especie (20), transformación de sus fibras en artesanías (18), producción tradicional (cultivo *in situ*) (17) y comercialización de las artesanías (15). Sin embargo, se encontró un nulo desarrollo de técnicas de propagación de la especie, un problema que se acentúa si se considera la alta demanda de sus ejemplares para la fabricación de artesanías. Por lo que áreas de investigación poco exploradas como la propagación *in vitro* pueden contribuir al abastecimiento de la materia prima de un mercado emergente sobre productos y subproductos de la palma jipi. Para el caso de México, la investigación se focalizó en el sureste, que coincide con la región donde se cultiva la especie, pero que evidenció un nulo desarrollo en técnicas sobre su propagación.

Palabras clave: Análisis bibliométrico, Campeche, palma iraca, palma jipi, palma jipijapa, paja toquilla.

Abstract

Carludovica palmata Ruíz & Pavón is a palm species with great potential in the manufacture of handicrafts, but with limited agricultural management. It is native to Ecuador, and in Mexico it is only distributed in Campeche in the southeast of the country; it serves as raw material for manufacturing Jipi palm hats. The objective of this work is to analyze the spatio-temporal evolution of research published in scientific articles where the species was studied, using bibliometric techniques to identify areas of opportunity in research that have been little developed. We found 78 texts from 1961 to 2022 whose spatio-temporal evolution showed an exponential growth that concentrated in countries of America: Colombia (38), Mexico (11) and Ecuador (8). The most recurrent research topics were botany of the species (20), transformation of its fibers into handicrafts (18), traditional production (*in situ* cultivation) (17) and commercialization of handicrafts (15). However, a null development of propagation techniques of the species was found, a problem that is accentuated if one considers the high demand for its specimens for the manufacture of handicrafts. Therefore, little explored areas of research such as *in vitro* propagation can contribute to the supply of the raw material of an emerging market on products and by-products of the jipi palm. In the case of Mexico, the research focused on the southeast, which coincides with the region where the species is cultivated, but which showed a lack of development in techniques on its propagation.

Keywords: Bibliometric analysis, Campeche, iraca palm, jipi palm, jipijapa palm, toquilla straw.

Forma sugerida de citar: Perera-Hau, L.A., Santillán-Fernandez, A., Aguilar-Gallegos, N., Alamilla-Magaña, J.C., Gonzales-Estrada, T.A., y Caamal-Velázquez, J.H. (2025). Meta-análisis de la información científica sobre la especie *Carludovica palmata* Ruíz & Pavón. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*. Vol. 42(2):122-135. <https://doi.org/10.17163/lgr.n42.2025.08>.

IDs Orcid:

Lucero Alejandra Perera-Hau: <https://orcid.org/0009-0008-4179-6291>
Alberto Santillán-Fernández: <https://orcid.org/0000-0001-9465-1979>
Norman Aguilar-Gallegos: <https://orcid.org/0000-0002-4788-3360>
Juan Carlos Alamilla-Magaña: <https://orcid.org/0000-0003-4397-3358>
Tomás Augusto González-Estrada: <https://orcid.org/0000-0002-9936-591x>
José Humberto Caamal-Velázquez: <https://orcid.org/0000-0002-4667-5885>

1 Introducción

Carludovica palmata Ruiz & Pavón también conocida como palma jipi en México, paja toquilla o jipijapa en Ecuador, e iraca en Colombia, es una *Cyclanthaceae* que se cultiva desde el sur de México hasta el norte de Bolivia, con especial presencia en Colombia, Panamá y Ecuador (de donde se considera es originaria) (Bennett et al., 1992). De esta palma se aprovechan sus fibras suaves, flexibles y duraderas, con las que se tejen sombreros y otras artesanías (Galviz et al., 2019). Estas artesanías se comercializan en su mayoría en mercados locales y contribuyen con la economía de productores rurales para los que la palma tiene una fuerte influencia cultural (Fadiman, 2001).

Sobre *C. palmata* se han desarrollado estudios que describen la botánica de la especie (López et al., 2013; Garcés et al., 2017), su relación cultural con etnias como los Quechuas en Ecuador (Bennett et al., 1992) y Maya en México (Fadiman, 2001). Estudios sobre plagas y enfermedades que afectan a su cultivo (Cordova et al., 2000; Franz and O'Brien, 2001), técnicas de biotecnología para mejorar la calidad de sus fibras en los procesos de transformación a artesanías (Ortega et al., 2012; Galviz et al., 2019), e incluso procesos de propagación *in vitro* (Hoyos-Sánchez et al., 2020).

Sin embargo, a pesar de estas publicaciones y de la importancia cultural y económica de la especie para productores agrícolas y artesanos de las regiones donde se cultiva *C. palmata*, existe poca investigación que haya tomado a la especie como objeto de estudio (Galviz et al., 2019). Este fenómeno puede deberse en gran medida a que es un recurso local con creciente valor comercial, asociado a la fabricación artesanal de sombreros como único producto (Ortega et al., 2012).

En este sentido, para conocer la investigación desarrollada en torno a un tópico y determinar áreas de oportunidad para generar nuevo conocimiento, los estudios bibliométricos a partir del análisis de artículos científicos suelen ser una buena herramienta (Cañas-Guerrero et al., 2013). La publicación de un trabajo científico es el modo más efectivo de transmitir un conocimiento adquirido como consecuencia de la investigación, y mediante la bibliometría se pueden generar indicadores para

medir los resultados de la actividad científica y tecnológica (Allen et al., 2009). Comprender la información científica que se publica en torno a un tema permite tomar decisiones en relación con su mejora y detectar áreas de investigación no desarrolladas (Martínez-Santiago et al., 2017). Los estudios bibliométricos se han aplicado desde especies focalizadas con valor comercial como *Brosimum alicastrum Swartz* (Espinosa-Grande et al., 2023), hasta cultivos de relevancia mundial como el maíz (Santillán-Fernández et al., 2021), el trigo (Giraldo et al., 2019) y el arroz (Sun and Yuan, 2020).

Sin embargo, a pesar de los alcances que un estudio bibliométrico puede representar en la brecha de conocimiento sobre un tópico o especie en particular, para *C. palmata* aún existen vacíos en la investigación en los que la bibliometría puede incidir. Bajo este contexto el objetivo de este estudio es analizar la evolución espacio-temporal de la investigación publicada en artículos científicos donde la especie *C. palmata* es objeto de estudio mediante técnicas bibliométricas, para identificar áreas de oportunidad en la investigación que han sido poco desarrolladas.

2 Materiales y Métodos

2.1 Origen de la información

En este trabajo se consideraron artículos científicos donde la especie *C. palmata* fue objeto de estudio. Mediante un análisis de contenido, se omitieron los trabajos donde la especie se menciona, pero no se desarrolló algún análisis. Las palabras clave utilizadas en la búsqueda de los artículos científicos fueron *Carludovica palmata* Ruiz & Pavón, palma iraca, palma jipi, y paja toquilla. Se consideraron los artículos científicos disponibles en las principales editoriales (Elsevier, Scopus y Springer), base de datos de artículos de revistas de acceso abierto (Conricyt, Scielo, Redalyc, Latindex, Claryvate Analytics, Periodica y DOAJ), y el motor de búsqueda web de libre acceso Google Scholar. Adicionalmente, se utilizó la técnica "bola de nieve" para obtener los artículos faltantes, a partir de la lista de referencias de los artículos encontrados inicialmente (Leipold, 2014). Los artículos científicos se recopilaron de enero a febrero de 2023, y se consideraron los textos disponibles hasta diciembre de 2022.

2.2 Análisis de la información

Mediante un análisis de contenido, las variables evaluadas de cada uno de los artículos científicos fueron nombre de los autores, año de publicación, número de citas, título, resumen del texto, palabras clave, nombre de la revista, institución de adscripción del primer autor, país de origen del primer autor, y área de estudio donde se desarrolló la investigación. La captura de las variables se realizó en una hoja de cálculo, y se respetó el idioma original de cada uno de los textos. Durante la captura de toda la información se estandarizaron algunos registros, se eliminaron o cambiaron caracteres especiales para facilitar el análisis, tales como: ñ (por n), acentos, superíndices, subíndices, ®, ©, entre otros (Aguado-López et al., 2009). Siguiendo la metodología de Santillán-Fernández et al. (2021), Espinosa-Grande et al. (2023), y Santillán-Fernández et al. (2023) se construyeron gráficas de temporalidad de la producción científica con la ayuda de las variables año de publicación, y número de citas.

Adicionalmente se estimó un modelo de regresión por mínimos cuadrados ordinarios para determinar la tendencia en la frecuencia de las publicaciones (Gujarati, 2007). Por considerar que en el primer autor recae la mayor parte de la responsabilidad en la redacción y publicación de un artículo científico (Aguado-López et al., 2009), se ubicó espacialmente el país de origen del primer autor con las áreas de estudio, con la finalidad de conocer dónde se está desarrollando investigación sobre la especie *C. palmata*, para ello se recurrió al paquete geográfico ARGIS® (ESRI, 2021).

A partir de un análisis de contenido de los títulos de los artículos científicos, sus resúmenes, y palabras clave, se determinó la temática que abordaron cada uno de los textos. Para ello se recurrió a la clasificación propuesta en Scopus (2023) para la especie *C. palmata*. En complemento, se entrevistó a especialistas de la Universidad Autónoma de Yucatán (1) y Colegio de Postgraduados campus Campeche (2). Se definieron siete temas: 1) Transformación, en esta categoría se clasificaron los trabajos asociados con usos de la palma en la fabricación de artesanías, 2) Producción tradicional (trabajos relacionados con el cultivo de la especie mediante un manejo agronómico convencional), 3) Producción *in vitro* (trabajos que analizaron la reproducción de plantas de la especie en ambientes artificiales), 4) Comercialización (trabajos asociados a organiza-

ción de productores, formas de agregar valor, venta, distribución y exportación de los productos y subproductos obtenidos de la especie), 5) Botánica (trabajos asociados a la taxonomía de la especie), 6) Plagas y enfermedades (trabajos que analizaron las plagas y enfermedades que afectan al cultivo de la especie), y 7) Antropología (trabajos que describieron la importancia cultural de la especie en las comunidades donde se distribuye).

Una vez clasificados los artículos científicos por el tema que desarrollaron, se construyó un gráfico de las temáticas de acuerdo al país de origen del primer autor, y la temporalidad de las mismas, con la intención de determinar áreas potenciales para el desarrollo del nuevo conocimiento sobre la especie *C. palmata* por país. Finalmente, se generaron indicadores bibliométricos para conocer a los principales artículos científicos, autores y revistas científicas que han publicado sobre la especie. Para ello, con ayuda de la variable nombre de los autores, se construyeron redes de coautoría en el software Gephi (Bastian et al., 2009); y se asociaron las variables país del primer autor, institución de adscripción del primer autor, áreas de estudio, y citas bibliográficas para determinar los artículos científicos de mayor relevancia medidos por el número de citas, y las instituciones y áreas de estudio por país que han generado conocimiento sobre la especie. Para el caso de México se asociaron espacialmente todas las instituciones (del primer autor y colaboradores) que desarrollan investigación sobre la especie, con la región donde se cultiva.

3 Resultados y Discusión

3.1 Análisis espacio temporal

De 1961 a 2022 se publicaron un total de 78 artículos científicos donde la especie *C. palmata* fue objeto de estudio. Esta producción científica dio origen a 356 citas bibliográficas (Figura 1). El primer trabajo registrado fue en el año 1961. Sin embargo, a partir del año 2001 se presentó una producción creciente para la especie. El periodo de mayor productividad fue de 2001 a 2021 con el 76,92% del total de textos (60), lo que contribuyó a una tendencia exponencial en el crecimiento de las publicaciones ($R^2 = 0,2785$). Los trabajos más citados fueron los publicados en el período 1961-2001 que en conjunto sumaron el 61,80% del total de citas bibliográficas (220).

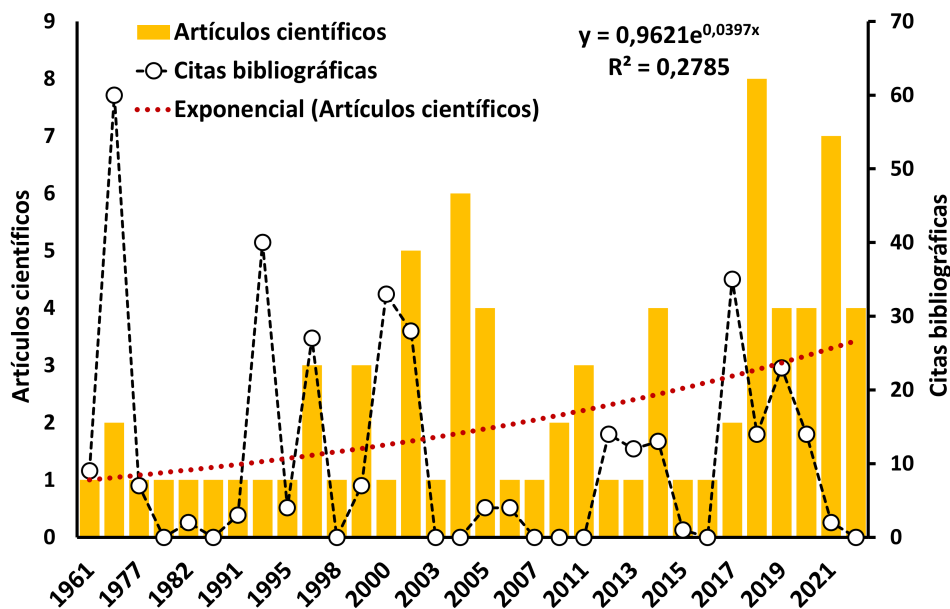


Figura 1. Evolución temporal de la producción científica y citas bibliográficas donde la especie *C. palmata* fue objeto de estudio de 1961 a 2022.

Poot-Pool et al. (2018) atribuyen este crecimiento en el número de publicaciones al reciente valor comercial de la especie como materia prima de artesanías regionales en Latinoamérica, de donde es originaria. Este valor comercial ha provocado que *C. palmata* sea un tema de investigación recurrente en el sureste de México, América Central, y Sudamérica, al ser un recurso local que ayuda al desarrollo económico de las regiones rurales donde se distribuye (Galviz et al., 2019). Sin embargo, Ortega-Haas et al. (2020) encontraron que se requiere más investigación sobre el cultivo de la especie para asegurar la materia prima de las actividades económicas que se desarrollan en torno a ella.

De acuerdo con el país de origen del primer autor de los artículos científicos, los 78 trabajos se originaron en 12 países: Colombia (48,72%, 38 textos), México (14,10%, 11), Ecuador (10,26%, 8), Estados Unidos de América (7,69%, 6), Costa Rica (6,41%, 5), Perú (5,13%, 4), Alemania (1,28%, 1), Austria (1,28%, 1), Brasil (1,28%, 1), Canadá (1,28%, 1), España (1,28%, 1) y Nicaragua (1,28%, 1) (Figura 2). En la Figura 2 se observa que la mayoría de la investigación que se ha desarrollado sobre *C. palmata* ha sido en países Latinoamericanos (68 textos,

87,18%). Además, el área de estudio de los 78 artículos analizados se ubicó espacialmente en esta región de América. Este hecho se explica debido a que el centro de origen de la especie se localiza en la provincia de Manabí en Ecuador (Ruiz and Pavón, 1798), y de ahí se ha distribuido al sureste de México, América Central, y la amazonia en Sudamérica (Bristol, 1961).

Los estudios de investigación donde más conocimiento se ha desarrollado sobre la especie *C. palmata* fueron: Botánica (20 textos, 25,64%), Transformación (18, 23,09%), Producción tradicional (17, 21,79%), y Comercialización (15, 19,23%), en conjunto representaron el 89,75% (70 textos) (Tabla 1). Sin embargo, durante el periodo de análisis (1961-2022) se encontró que, aunque los primeros estudios fueron sobre la Botánica de la especie (1961), no es sino hasta 1978 que aparecen artículos científicos sobre Transformación y Comercialización, y a partir de 1987 se publican textos asociados al cultivo de la especie, y su manejo agronómico (2000). También resalta el hecho de que a partir del año 2020 aparecen las primeras investigaciones sobre técnicas de propagación de la especie en ambientes artificiales (Producción *in vitro*).

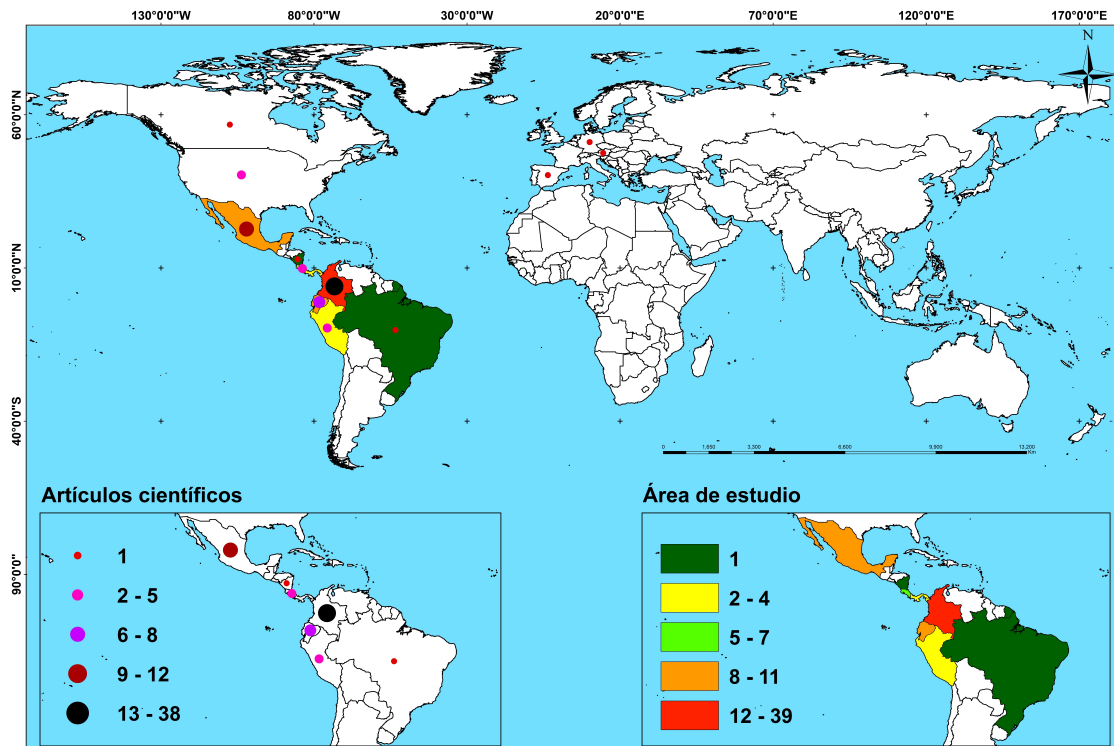


Figura 2. Localización espacial a nivel internacional de las áreas de estudio y productividad de textos científicos donde la especie *C. palmata* fue objeto de análisis de 1961 a 2022.

En nueve de los 12 países que desarrollaron investigación sobre *C. palmata*, el tema de Botánica fue recurrente (Figura 3). Por otra parte, los temas asociados a su cultivo tradicional solo se encontraron en 4 países (Colombia, México, USA y Canadá), siendo Colombia y México los países donde se ha reportado el cultivo *in situ* (Ortega-Haas et al., 2020). Respecto a trabajos sobre la propagación *in vitro* de la especie, sólo Colombia ha reportado avances en esta materia. Por lo que, para el caso

de México, temas sobre propagación *in vitro*, manejo agronómico de la especie, y esquemas de comercialización son áreas aún por explorar. De acuerdo con Espinosa-Grande et al. (2023), cuando se potencializan los usos de una especie local, el problema es generar investigación sobre su reproducción ya sea sexual o asexual, con la finalidad de abastecer la materia prima de las actividades económicas que se crean en torno a la especie.

Tabla 1. Temporalidad de los temas de investigación desarrollados en torno a la especie *C. palmata* de 1961 a 2022.

Tema	Artículos científicos		Periodo
	Numero	%	
Botánica	20	25,64	1961-2022
Transformación	18	23,09	1978-2021
Producción tradicional	17	21,79	1987-2022
Comercialización	15	19,23	1978-2021
Antropología	4	5,13	1992, 2001
Plagas y enfermedades	2	2,56	2000-2001
Producción <i>in vitro</i>	2	2,56	2020, 2022
Total	78	100	1961-2022

3.2 Indicadores bibliométricos

De los 78 artículos científicos, el 79,49% (62 textos) se publicaron en idioma español, y el 20,5% (16) en inglés. De las 356 citas bibliográficas, el 24,44% (87) corresponden a textos publicados en español, y el 75,56% (269) a textos en inglés. De acuerdo con Li and Zhao (2015) el idioma inglés es adoptado como universal por la comunidad científica, por lo que las publicaciones en inglés tienen mayor probabilidad de difusión entre la comunidad internacional. De hecho, ocho de los 10 artículos científicos más citados fueron publicados en idioma inglés (Tabla 2), en conjunto estos ocho artículos tuvieron el 62,08% de las citas bibliográficas (221), y fueron publicados por revistas con factores de impacto en su mayoría superiores a 3. Santillán-Fernández et al. (2021) encontraron que el factor de impacto de las revistas incrementa la probabilidad de llegar a un mayor número de usuarios.

Respecto a los temas de investigación desarrollados por los 10 artículos más citados, resaltan los trabajos asociados con la importancia cultural de la especie *C. palmata* en comunidades indígenas de Ecuador (Quechuas) y México (Mayas). Además de los trabajos publicados en torno a plagas y enfermedades, cuya área de estudio estuvo en países donde existe el cultivo de la especie *in situ* (Méxi-

co y Ecuador). Por lo que aspectos culturales y de manejo agronómico del cultivo se presentan como áreas de oportunidad para la generación de nuevo conocimiento. En la Tabla 2 también se observa que cinco de los 10 trabajos se desarrollaron por autores cuyo país de origen fue diferente al área de estudio (USA: 4, y Canadá: 1).

En la Tabla 3 se puede observar que en los países donde se distribuye de manera natural la especie *C. palmata* (Colombia, México, Ecuador, Costa Rica, Perú, Nicaragua y Brasil), las instituciones que han desarrollado investigación en torno a ella ubican sus áreas de estudio espacialmente dentro de su territorio, lo que no ocurre para el caso de los países europeos (Alemania, Austria y España), USA y Canadá. Gersbach and Schneider (2015) encontraron que los países con economías consolidadas como USA y Europeos invierten más en sus centros de investigación, lo que les permite generar estudios fuera de sus fronteras. En complemento Espinosa-Grande et al. (2023) encontraron que, en especies locales focalizadas, la generación de nuevo conocimiento por investigadores ajenos a las áreas de estudio es recurrente. Por lo tanto, fortalecer las redes de coautoría internacional constituye una opción viable para generar nuevo conocimiento en regiones de interés con inversiones externas (Aguado-López et al., 2009).

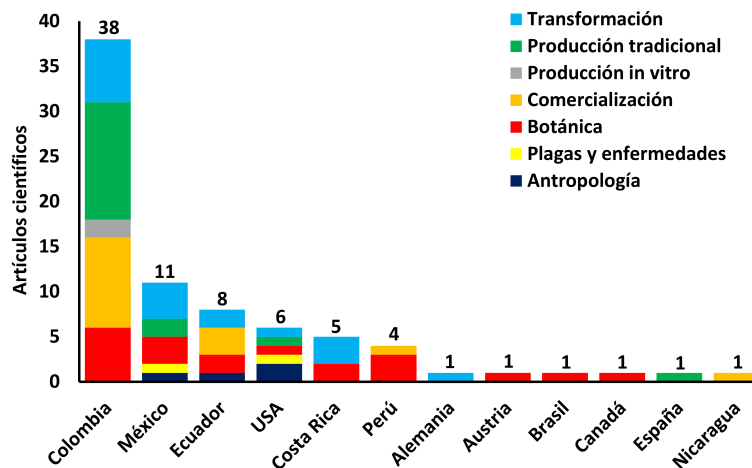


Figura 3. Temas de investigación de las principales naciones que publicaron artículos científicos donde la especie *C. palmata* fue objeto de estudio de 1961 a 2022.

Tabla 2. Indicadores bibliométricos de los principales artículos científicos donde la especie *C. palmata* fue objeto de estudio de 1961 a 2022, ordenados según el número de citas bibliográficas.

Autor	Primer Autor		País	Revista científica			Tema	Área de Estudio
	Institución	Nombre		JCR (WoS, 2021)	Idioma	Citas		
Bennett et al. (1992)	Jardín Botánico de NY	Economic Botany	USA	Q2 / 2.6	Inglés	35	Antropología	Ecuador
Cordova et al. (2000)	CICY	Plant Disease	México	Q1 / 4.6	Inglés	37	Plagas y enfermedades	México
Garcés et al. (2017)	PUCE	Frontiers in Microbiology	Ecuador	Q1 / 6.1	Inglés	37	Botánica	Ecuador
Wilder (1976)	Universidad de Illinois	American Journal of Botany	USA	Q1 / 3.3	Inglés	34	Botánica	Panamá
Anderson and Gomez (1997)	MuCaNa	Revista de Biología Tropical	Canadá	Q3 / 0.8	Inglés	21	Botánica	Costa Rica / Panamá
Galviz et al. (2019)	UNC-Medellín	Food and Bioproducts Processing	Colombia	Q1 / 5.1	Inglés	27	Transformación	Colombia
Franz and O'Brien (2001)	Universidad de Cornell	Annals of the Entomological Society of America	USA	Q2 / 2.7	Inglés	20	Plagas y enfermedades	Costa Rica / Panamá / Ecuador
Ortega et al. (2012)	Liceo Bella Suiza	UDCA	Colombia	No tiene	Español	14	Transformación	Colombia
López et al. (2013)	UPS	Ingenius Economic Botany	Ecuador	No tiene	Español	12	Botánica	Ecuador
Fadiman (2001)	Universidad de Texas		USA	Q2 / 2.6	Inglés	10	Antropología	México

NY: Nueva York; CICY: Centro Investigaciones Científicas de Yucatán; PUCE: Pontificia Universidad Católica del Ecuador; MuCaNa: Museo Canadiense de la Naturaleza; UNC-Medellín: Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín; UPS: Universidad Politécnica Salesiana; UDCA: Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica; Ingenius: Revista de Ciencia y Tecnología; A_ Entomological _SA: Annals of the Entomological Society of America; USA: Estados Unidos de América

Tabla 3. Asociación de las principales instituciones de investigación y sus áreas de estudio por país, que han publicado artículos científicos donde la especie *C. palmata* fue objeto de estudio de 1961 a 2022.

País	Instituciones	Área de estudio
Colombia (38)	UNC-Medellín (13)	Nariño, Colombia (8)
	Universidad de Antioquia (9)	Usiacurí, Colombia (7)
	Universidad de Nariño (8)	Medellín, Colombia (5)
	PU-Javeriana (4)	Chocó, Colombia (4)
	Colegio Liceo bella Suiza (1)	Bolívar, Colombia (4)
	Universidad de Córdoba (1)	Boyacá, Colombia (3)
	UC-Barranquilla (1)	Sucre, Colombia (3)
	Universidad de los Andes (1)	Lorica, Colombia (3) Huila, Colombia (1)
México (11)	CICY (4)	Campeche, México (11)
	IT-Chiná (2)	
	ECOSUR-Cam (2)	
	IT-Mérida (1)	
	ITS-Calkiní (1)	
	UA-NLeón (1)	
Ecuador (8)	Universidad Politécnica Salesiana (5)	Manabí, Ecuador (5)
	PUCE (2)	Cuenca, Ecuador (3)
USA (6)	Universidad del Azuay (1)	
	Universidad de Illinois (1)	México (1)
	Jardín Botánico de NY (1)	Colombia (2)
	Universidad de Cornell (1)	Costa Rica (1)
	Universidad de Texas (1)	Panamá (1)
Universidad de Harvard (1)	Ecuador (1)	
Costa Rica (5)	Universidad Estatal de Cleveland (1)	
	CATIE-CR (3)	Puntarenas, Costa Rica (3)
	Universidad de Costa Rica (1)	Cartago, Costa Rica (2)
Perú (4)	Universidad Nacional de Costa Rica (1)	
	UNCP (2)	Ucayali, Perú (3)
Nicaragua (1)	UNIA (2)	Lima, Perú (1)
	UNA-Camoapa	Nicaragua (1)
Alemania (1)	Universidad de Ulm (1)	Guyana Francesa (1)
Austria (1)	Universidad de Viena (1)	Costa Rica (1)
Brasil (1)	Universidad Estatal Paulista (1)	Brasil (1)
Canadá (1)	Museo canadiense de la naturaleza (1)	Costa Rica / Panamá (1)
España (1)	Universidad Politécnica de Valencia (1)	Ecuador (1)
Total (78)	35	9

UNC-Medellín: Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín; PU-Javeriana: Pontificia Universidad Javeriana; UC-Barranquilla: Universidad de la Costa Barranquilla; CICY: Centro Investigaciones Científicas de Yucatán; IT-Mérida: Instituto Tecnológico de Mérida; UA-Chapingo: Universidad Autónoma Chapingo; IT-Chiná: Instituto Tecnológico de Chiná; ECOSUR-Cam: El Colegio de la Frontera Sur sede Campeche; ITS-Calkiní: Instituto Tecnológico Superior de Calkiní; UA-NLeón: Universidad Autónoma de Nuevo León; PUCE: Pontificia Universidad Católica del Ecuador; NY: Nueva York; CATIE-CR: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza sede Costa Rica; UNCP: Universidad Nacional del Centro de Perú; UNIA: Universidad Nacional Intercultural de la Amazonía; UNA-Camoapa: Universidad Nacional Agraria Camoapa.

En el caso de México, se encontró que en su mayoría las instituciones o centros de investigación que han tomado a la especie *C. palmata* como objeto de estudio se localizan espacialmente en el sureste del país (ocho de 11 instituciones) y en la totalidad

de los casos han tenido como referencia de área de estudio al municipio de Calkiní en Campeche (Figura 4). Espinosa-Grande et al. (2023) encontraron que en especies con creciente valor comercial es frecuente el desarrollo de nuevo conocimiento por institu-

ciones ubicadas espacialmente dentro de la región donde se cultiva o distribuye de manera natural la especie, lo que de acuerdo con Santillán-Fernández et al. (2021) facilita los procesos de transferencia de tecnología hacia los productores agrícolas.

4 Red de coautoría

En los 78 textos analizados se encontraron 63 primeros autores diferentes, entre primer autor y coautores sumaron 112 individuos diferentes. La red de autores y coautores (Figura 5) estuvo compuesta de 112 nodos (autores) y 90 aristas (vínculos). Los vínculos en un análisis de redes de coautoría son importantes porque es a través de ellos que un autor puede alcanzar ciertas ideas, conocimiento e información que socialmente es distante para él (Granovetter, 1973). Los principales autores que desarrollaron investigación donde la especie *C. palmata* fue objeto de estudio de 1961 a 2022 fueron Galviz_Quesada_A (4 textos) de la Universidad Nacional de Colombia sede Me-

dellín (UNC-Medellín) en temas de biotecnología aplicada a procesos de transformación de la especie; Zambrano_Arteaga_JC (3 textos, Fundación Universitaria Navarra), Chicaiza_Finley_D (3, UNC-Medellín), y Hoyos_Sanchez_RA (3, UNC-Medellín) que generaron investigación en su mayoría sobre biotecnología aplicada a la propagación *in vitro* de la especie.

En la red de autores también destaca Lopez_L (3 textos) de la Universidad Politécnica Salesiana del Ecuador, quien también ha aplicado procesos de biotecnología en favor de la transformación de la especie en productos con valor comercial. En la Figura 5 se observa una subred compuesta por los investigadores de México: Cordova_I (CICY), Cetzal:Ix_W (IT-Chiná), Ortega_Hass_JJ (ECOSUR-Camp), Godoy_Hernandez_G (CICY), Munoz_Sanchez_A (CICY), y Gonzalez_Estrada_T (CICY), quienes al igual que los investigadores de Colombia y Ecuador han aplicado metodologías de biotecnología para revalorizar los usos de la especie.

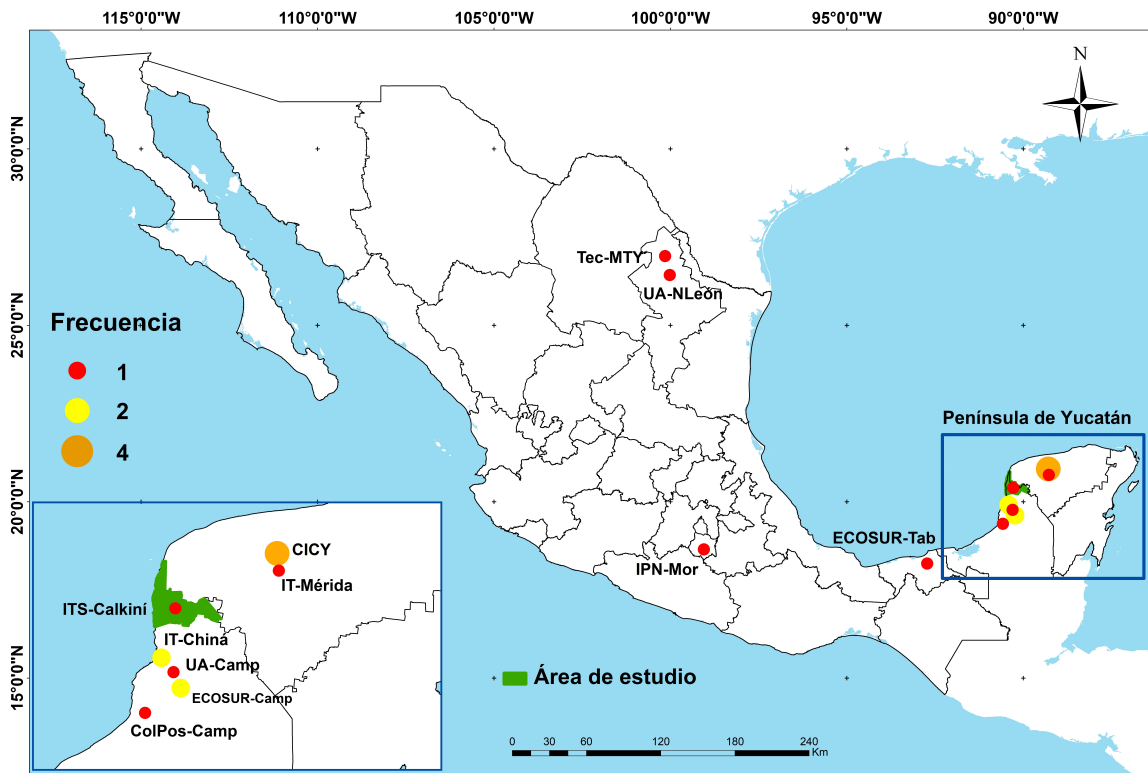


Figura 4. Distribución espacial de las instituciones de investigación en México que publicaron artículos científicos donde la especie *C. palmata* fue objeto de estudio de 1961 a 2022.

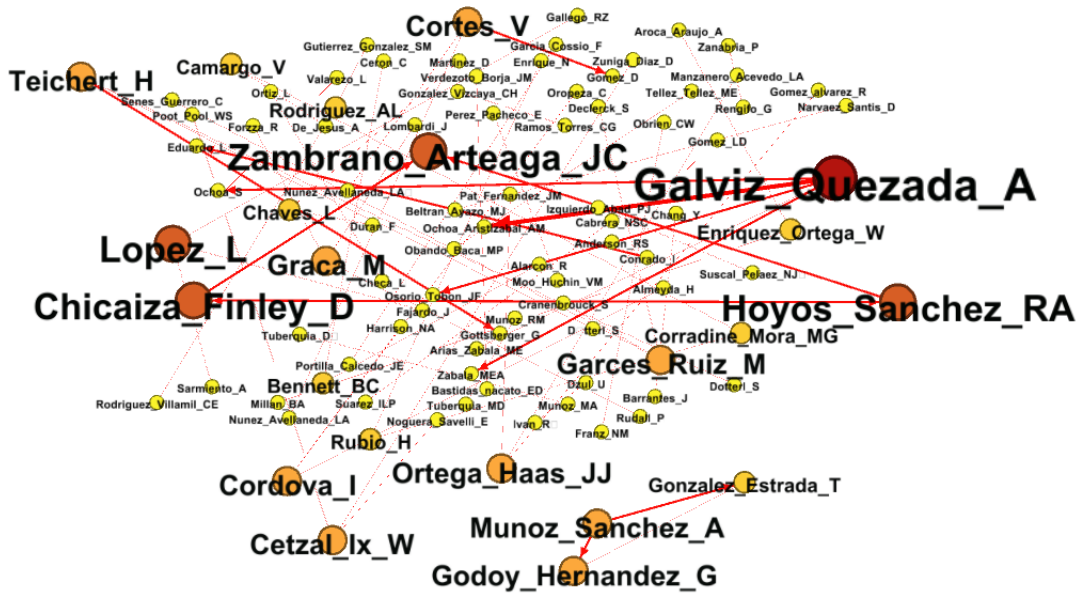


Figura 5. Red de autores y colaboradores a nivel internacional que desarrollaron investigación sobre la especie *C. palmata* de 1961 a 2022. El tamaño del nodo corresponde con su productividad.

Santillán-Fernández et al. (2023) encontraron que en general para el sector forestal no maderable de México, la biotecnología es un área de oportunidad, sobre todo para aquellas especies focalizadas y de reciente valor comercial, donde la mayoría de la investigación se ha centrado en describir la botánica y bondades de uso de las especies, dejando vacíos en el conocimiento de cómo mejorar la calidad de la materia prima (Espinoso-Grande et al., 2023).

el objeto de estudio) de las publicaciones (Santillán-Fernández et al., 2023). Por lo que las sinergias con autores de otras instituciones puede ser una buena estrategia para mejorar la cantidad y calidad de las investigaciones sobre *C. palmata* a nivel nacional e internacional.

5 Conclusiones

La densidad de la red de coautoría tuvo un valor de 0,002, lo que dejó de manifiesto la poca colaboración entre autores de diferentes países. La densidad es un indicador en el análisis de redes de coautoría que implica qué tanto los nodos interactúan (se vinculan) entre sí; matemáticamente es un valor dentro del intervalo [0 a 1], entre más cercano al 1 la interacción en la red es mayor (Aguilar-Gallegos et al., 2016). Sin embargo, para el caso de Colombia y México se encontró que los autores de una misma institución tienden a asociarse entre sí, lo que de acuerdo con Silva et al. (2014) restringe la crítica constructiva y reduce la retroalimentación sobre la pertinencia de la investigación. Además de que los grupos de investigación institucionales tienden a replicar las mismas metodologías en diferentes áreas de estudio, lo que limita la innovación en la investigación y permite la circularidad (redundancia en

La evolución espacio-temporal de la producción científica mostró un crecimiento exponencial de los textos científicos donde la especie *C. palmata* fue un tema de investigación de 1961 a 2022. Esta productividad se concentró en países de América, donde la especie se distribuye de manera natural: Colombia (38), México (11) y Ecuador (8). Los temas de investigación más recurrentes fueron: botánica de la especie (20), transformación de sus fibras en artesanías (18), producción tradicional (cultivo *in situ*) (17) y comercialización de las artesanías (15). Sin embargo, los trabajos de mayor impacto (medido por el número de citas bibliográficas) fueron desarrollados en su mayoría por investigadores de Estados Unidos y Canadá, quienes los realizaron en Latinoamérica, pero fueron publicados en revistas de alto impacto y en idioma inglés. Por lo que la investigación sobre *C. palmata* en Latinoamérica tiene

un amplio margen de mejora a través de la publicación de textos en inglés y en revistas de mayor impacto.

Se encontró un vacío de investigación en temas asociados con el manejo del cultivo y formas de propagación en ambientes artificiales (*in vitro*), y a excepción de Colombia, ningún país ha publicado al respecto. Para el caso de México, la investigación sobre *C. palmata* se focalizó en el sureste del país, y estuvo liderada por centros de investigación como el CICY, IT-Chiná y ECOSUR-Camp, ubicados espacialmente alrededor de la región donde se distribuye de manera natural la especie, lo que puede ser un factor de éxito para que la generación del nuevo conocimiento tenga un mayor impacto al facilitar la transferencia de tecnología, en particular si se considera que la investigación en torno a *C. palmata* es incipiente. También se encontró que los autores de una misma institución tienden a asociarse entre sí, lo que limita la crítica constructiva y reduce la retroalimentación sobre la pertinencia de la investigación. Por lo que las sinergias con autores de otras instituciones puede ser una buena estrategia para mejorar la cantidad y calidad de las investigaciones sobre la especie.

Finalmente, las técnicas bibliométricas mostraron ser una buena metodología para la identificación de áreas de oportunidad para el desarrollo de nuevo conocimiento en torno a la especie *C. palmata*. Sin embargo, se debe considerar el carácter teórico de los hallazgos como una manera de ampliar el estado del arte, por lo que se sugiere que estudios posteriores se centren en la aplicación práctica de los hallazgos científicos para la gestión agrícola del cultivo, así como para la conservación de la especie.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnología (Conahcyt), por la beca 1176129 otorgada al primer autor para sus estudios de Maestría en Ciencias en Bioprospección y Sustentabilidad Agrícola en el Trópico (BIOSAT); y por el proyecto cátedra 364: Reconversión productiva sustentable para el desarrollo de los productores rurales de Campeche, otorgado al segundo autor.

Contribución de los autores

L.A.P.H.: Curación de datos. A.S.F.: Conceptualización, Análisis formal, Metodología, Escritura–revisión y edición. N.A.G.: Escritura–borrador original. J.C.A.M.: Supervisión. T.A.G.E.: Supervisión. J.H.C.V.: Administración de proyecto.

Referencias

- Aguado-López, E. and Rogel-Salazar, R., Garduño-Oropeza, G., Becerril-García, A., Zúñiga-Roca, M. F., and Velázquez-Álvarez, A. (2009). Patrones de colaboración científica a partir de redes de coautoría. *Convergencia Revista de Ciencias Sociales*, 6:225–258. Online: <https://n9.cl/0z8i2x>.
- Aguilar-Gallegos, N., Martínez-González, E., Aguilar-Ávila, J., Santoyo-Cortés, H., Muñoz-Rodríguez, M., and García-Sánchez, E. (2016). Análisis de redes sociales para catalizar la innovación agrícola: de los vínculos directos a la integración y radialidad. *Estudios Gerenciales*, 32(140):197–207. Online: <https://n9.cl/loyr9>.
- Allen, L., Jones, C., Dolby, K., Lynn, D., and Walport, M. (2009). Looking for landmarks: the role of expert review and bibliometric analysis in evaluating scientific publication outputs. *PLoS one*, 4(6):e5910. Online: <https://n9.cl/af06p>.
- Anderson, R. and Gomez, L. (1997). *Systemotelus*, a remarkable new genus of weevil (Coleoptera: Curculionidae) associated with *Carludovica* (Cyclanthaceae) in Costa Rica and Panamá. *Revista de Biología Tropical*, 45(2):887–904. Online: <https://n9.cl/30pk1n>.
- Bastian, M., Heymann, S., and Jacomy, M. (2009). Gephi: An open-source software for exploring and manipulating networks. In *Proceedings of the International AAAI Conference on Web and Social Media*, volume 3, pages 361–362. Online: <https://n9.cl/1o0ea1>.
- Bennett, B., Alarcón, R., and Cerón, C. (1992). The ethnobotany of *Carludovica palmata* Ruíz & Pavón (Cyclanthaceae) in Amazonian Ecuador. *Economic Botany*, 46:233–240. Online: <https://n9.cl/2g5bs>.
- Bristol, M. (1961). *Carludovica palmata* in Broommaling. *Botanical Museum Leaflets Harvard University*, 19(9):183–189. Online: <https://n9.cl/d21re>.

- Cañas-Guerrero, I., Mazarrón, F., Pou-Merina, A., Calleja-Perucho, C., and Díaz-Rubio, G. (2013). Bibliometric analysis of research activity in the "Agronomy" category from the Web of Science, 1997–2011. *European Journal of Agronomy*, 50:19–28. Online:https://n9.cl/ziktr.
- Cordova, I., Oropeza, C., Almeyda, H., and Harrison, N. (2000). First report of a phytoplasma-associated leaf yellowing syndrome of palma jipi plants in southern Mexico. *Plant Disease*, 84(7):807–807. Online:https://n9.cl/ehd87e.
- Espinosa-Grande, E., Santillán-Fernández, A., Chávez-Vergara, B., Vargas-Díaz, A., Tadeo-Noble, A., and Bautista-Ortega, J. (2023). Space-time analysis of scientific research on *Brosimum alicastrum* swartz. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 76(1):10247–10261. Online:https://n9.cl/vsqmu.
- ESRI (2021). ArcGIS (versión 10.3) software de procesamiento digital de imágenes satelitales. Online:https://n9.cl/bi6n4.
- Fadiman, M. (2001). Hat weaving with Jipi, *Carludovica palmata* (cyclanthaceae) in the Yucatan Peninsula, Mexico. *Economic botany*, 55:539–544. Online:https://n9.cl/t04kh.
- Franz, N. and O'Brien, C. (2001). *Ganglionus*, a new genus of Derelomini (Coleoptera: Curculionidae) associated with *Carludovica* (Cyclanthaceae). *Annals of the Entomological Society of America*, 94(6):835–850. Online:https://n9.cl/lj82e.
- Galviz, A., Ochoa, A., Zabala, M., Ochoa, S., and Osorio, J. (2019). Valorization of iraca (*Carludovica palmata*, Ruiz & Pav.) infructescence by ultrasound-assisted extraction: An economic evaluation. *Food and Bioproducts Processing*, 118:91–102. Online:https://n9.cl/0mzjw.
- Garcés, M., Senés, C., Declerck, S., and Cranenbrouck, S. (2017). Arbuscular mycorrhizal fungal community composition in *Carludovica palmata*, *Costus scaber* and *Euterpe precatoria* from weathered oil ponds in the Ecuadorian Amazon. *Frontiers in Microbiology*, 8(2134):Online https://n9.cl/iwer2.
- Gersbach, H. and Schneider, M. (2015). On the global supply of basic research. *Journal of Monetary Economics*, 75:123–137. Online:https://n9.cl/71xdq.
- Giraldo, P., Benavente, E., Manzano-Agugliaro, F., and Gimenez, E. (2019). Worldwide research trends on wheat and barley: A bibliometric comparative analysis. *Agronomy*, 9(7):352. Online:https://n9.cl/xgoy7.
- Granovetter, M. (1973). The strength of weak ties. *American Journal of Sociology*, 78(6):1360–1380. Online:https://n9.cl/12fbh.
- Gujarati, D. (2007). *Econometría*. McGrawHill, Ciudad de México.
- Hoyos-Sánchez, R., Chicaíza-Finley, D., and Zambrano-Arteaga, J. (2020). In vitro multiplication of iraca palm (*Carludovica palmata* Ruiz & Pavón). *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 73(1):9039–9046. Online:https://n9.cl/gu8aq.
- Leipold, S. (2014). Creating forests with words-A review of forest-related discourse studies. *Forest Policy and Economics*, 40:12–20. Online:https://n9.cl/pvdv3.
- Li, W. and Zhao, Y. (2015). Bibliometric analysis of global environmental assessment research in a 20-year period. *Environmental Impact Assessment Review*, 50:158–166. Online:https://n9.cl/bv3za.
- López, L., Sarmiento, A., Fajardo, J., Valarezo, L., and Gallego, R. (2013). Determinación del porcentaje de humedad, solubles e insolubles en agua de la fibra de *Carludovica palmata* (paja toquilla). *Ingenius*, 9:23–27. Online:https://n9.cl/uvfd0.
- Martínez-Santiago, S., Alvarado-Segura, A., Zamudio-Sánchez, F., and Cristóbal-Acevedo, D. (2017). Spatio-temporal analysis of forest modeling in Mexico. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 23(1):5–22. Online:https://n9.cl/o8mto.
- Ortega, W., Millán, B., and Aroca Araújo, A. (2012). Análisis a los diseños de los sombreros de iraca elaborados en Colón-Génova, Nariño. *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, 15(1):227–237. Online:https://n9.cl/ij39i.
- Ortega-Haas, J., Pat-Fernández, J., Gómez-Álvarez, R., and Manzanero-Acevedo, L. (2020). Vermicompost growth and uptake in *Carludovica palmata* R. & P. in Campeche, Mexico. *Terra Latinoamericana*, 38(4):883–893. Online:https://n9.cl/e562j.

- Poot-Pool, W., Cetzal-Ix, W., González-Valdivia, N., Cuevas, M., Arcocha-Gomez, E., Pool, C., and Pascual-Baeza, A. (2018). Medios de vida de las familias que cultivan *Carludovica palmata* (cyclanthaceae) en Calkiní, Campeche, México. *IC investig@cción*, 13:63–73. Online:<https://n9.cl/wlkt6>.
- Ruiz, H. and Pavón, J. (1798). *Systema vegetabilium florum Peruvianae et Chilensis, characteres prodromi genericos differentiales specierum omnium differentias complectens*. Typis Gabrielis de Sancha. Online:<https://n9.cl/m50pl>.
- Santillán-Fernández, A., Salinas-Moreno, Y., Valdez-Lazalde, J., and Pereira-Lorenzo, S. (2021). Spatial-temporal evolution of scientific production about genetically modified maize. *Agriculture*, 11(3):246. Online:<https://n9.cl/avy46>.
- Santillán-Fernández, A., Vásquez-Bautista, N., Pelcastre-Ruiz, L., Ortigoza-García, C., Padilla-Herrera, E., Tadeo-Noble, A., Carrillo-Ávila, E., Juárez-López, J., Vera-López, J., and Bautista-Ortega, J. (2023). Bibliometric Analysis of Forestry Research in Mexico published by Mexican journals. *Forests*, 14:648. Online:<https://n9.cl/i23gt>.
- Scopus (2023). Base de datos bibliográfica de resúmenes y citas de artículos de revistas científicas propiedad de Elsevier. Online:<https://n9.cl/78woa>.
- Silva, T., Moro, M., Silva, A., Meira, W., and Laender, A. (2014). Community-based endogamy as an influence indicator. In *IEEE/ACM Joint Conference on Digital Libraries*, pages 67–76. Online:<https://n9.cl/k4wnl>.
- Sun, J. and Yuan, B. (2020). A bibliometric analysis of research on rice and irrigation from the 'Agronomy' category based on the Web of Science. *Current Science*, 119(3):438–446. Online:<https://n9.cl/4t8gs>.
- Wilder, G. (1976). Structure and development of leaves in *Carludovica palmata* (cyclanthaceae) with reference to other Cyclanthaceae and Palmae. *American Journal of Botany*, 63(9):1237–1256. Online:<https://n9.cl/42w14>.
- WoS (2021). Journal citation reports. Online:<https://n9.cl/ad5cu>.



ESTUDIO DE RESIDUOS BIOMÁSICOS AGRÍCOLAS PARA LA
INSTALACIÓN DE UNA BIORREFINERÍA DE PEQUEÑA ESCALA
STUDY OF AGRICULTURAL BIOMASS WASTE FOR THE INSTALLATION OF A
SMALL-SCALE BIOREFINERY

Josseline Mishell Solís Bermúdez, Gabriela Alexandra Zambrano Varela,
Ramón Eudoro Cevallos Cedeño y María Antonieta Riera*

Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas. Universidad Técnica de Manabí. Código Postal 130103, Portoviejo, Ecuador.
[<https://ror.org/02qgahb88>]

*Autor para correspondencia: maria.riera@utm.edu.ec

Manuscrito recibido el 29 de septiembre de 2021. Aceptado, tras revisión el 05 de julio 2022. Publicado el 1 de septiembre de 2025.

Resumen

En los últimos años se ha considerado el uso de residuos lignocelulosos para la producción de distintos bioproductos. Entre los países con este potencial está el Ecuador, el cual tiene una economía agraria, generadora de residuos que constituyen en su mayoría biomasa lignocelulósicas. La provincia de Manabí ubicada en la costa ecuatoriana es una zona agrícola cuyos residuos son por lo general quemados, dejados en el campo o usados para alimentación animal. Atendiendo a esta premisa, se desarrolló un análisis multicriterios a través del proceso de jerarquía analítica (AHP), en el cual se evaluaron 6 biomasa agrícolas: cascarilla de café, cáscara y mucílago de cacao, olote de maíz, cáscara de plátano y bagazo de caña de azúcar. Los mismos fueron ponderados por un panel de expertos en función a su potencial energético, composición, rendimiento de biomasa, costo de procesamiento e impacto ambiental. Para ello se consultó bibliográficamente la composición de los residuos (análisis proximal y elemental), así como las tecnologías actuales de procesamiento. A partir del AHP se conoció que la biomasa agrícola con mayor potencial de ser utilizado en una biorrefinería de pequeña escala es el bagazo de caña de azúcar (33,20%), seguido de la cascarilla de café (26,10%), siendo la caña de azúcar reconocida con mayor riqueza en polisacáridos y una fuente prometedora para la obtención de biocombustibles y otros productos químicos. Se espera que los resultados obtenidos sean de fundamento para otras investigaciones y de interés para el desarrollo bioeconómico del país.

Palabras clave: Biomasa, biorrefinería, Ecuador, biomasa, proceso de jerarquía analítica, residuos agrarios.

Abstract

In recent years, lignocellulose residues have been used for producing different bioproducts. Among the countries with this potential is Ecuador, which is characterized by having an agrarian economy, generating waste that constitutes mostly biomass of the lignocellulosic type. The province of Manabí, located on the Ecuadorian coast, is an agricultural area whose residues are usually burned, left in the field or used for animal feed. Based on this premise, a multicriteria analysis was developed through the Analytical Hierarchy Process (AHP), in which 6 agricultural biomasses from the Ecuadorian coast were evaluated: coffee husks, cocoa husks and mucilage, corn cob, banana peels and sugar cane bagasse. They were evaluated by a panel of experts based on their energy potential, biomass composition, yield, processing cost and environmental impact. The composition of the waste (proximal and elemental analysis) was bibliographically consulted, as well as current processing technologies. From the AHP, it was known that the agricultural biomass with the greatest potential to be used in a small-scale biorefinery is sugarcane bagasse (33.20%), followed by coffee husks (26.10%), being the recognized sugarcane with the greatest richness in polysaccharides and a promising source for obtaining biofuels and other chemical products. It is expected that the results obtained in this study will be the basis for other research and will be interesting for the bioeconomic development of the country.

Keywords: Biomass, biorefinery, Ecuador, biomass, analytical hierarchy process, agricultural wastes.

Forma sugerida de citar: Solís Bermúdez, J.M., Zambrano Varela, G.A., Cevallos Cedeño, R.E. y Riera, M.A. (2025). Estudio de residuos biomásicos agrícolas para la instalación de una biorrefinería de pequeña escala. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*. Vol. 42(2):136-153. <https://doi.org/10.17163/lgr.n42.2025.09>.

IDs Orcid:

Josseline Mishell Solís Bermúdez: <https://orcid.org/0000-0002-0637-4228>

Gabriela Alexandra Zambrano Varela: <https://orcid.org/0000-0002-7656-3817>

Ramón Eudoro Cevallos Cedeño: <https://orcid.org/0000-0002-8583-4674>

María Antonieta Riera: <https://orcid.org/0000-0002-7195-2821>

1 Introducción

La economía mundial está basada en la comercialización de productos y en la dependencia de recursos no renovables como el petróleo (Navarrete Loza and Saavedra Cuadrado, 2014). Aunque este ha sido el modelo principal de negocios, en la actualidad y en concordancia con las metas fijadas en los objetivos y metas de Desarrollo Sostenible 2030, muchos países están sumando esfuerzos para pasar de una economía tradicional a una bioeconomía. La bioeconomía se define como el uso de recursos (biomasa), procesos y principios biológicos innovadores para la obtención de bienes y servicios de manera sostenible (Birner, 2018). La biomasa se concibe como material de origen biológico, proveniente de organismos vivos o que alguna vez vivieron, excepto los incrustados en formaciones geológicas o fosilizados (Birner, 2018). La biomasa potencialmente utilizable como materia prima en las biorrefinerías (complejo industrial donde se lleva a cabo su procesamiento), puede ser de diversos tipos: agrícola, forestal, residuos orgánicos domésticos, microalgas, entre otros (Hernández Benítez and Céspedes Rangel, 2019).

El término biorrefinería nace en los noventa en base al concepto de Chemurgy, como un intento de producir una variedad de productos biobasados utilizando biomasa agrícola como materia prima (Pazmiñón Sánchez et al., 2017). El Laboratorio Nacional Estadounidense de Energía Renovable (NREL), destaca que las biorrefinerías son instalaciones que integran procesos y equipos de conversión de biomasa para producir una variedad de productos: combustibles, energía y químicos (Redondo-Gómez et al., 2020). Las mismas están destinadas a valorizar una diversa gama de materias primas renovables como la biomasa proveniente de la silvicultura, la acuicultura y residuos agrarios, entre los cuales se encuentran los de origen agrícola o ganadero (Katakojwala and Mohan, 2021).

Las biorrefinerías de primer nivel ubicadas en países desarrollados como Bélgica, Holanda, Francia, Austria y Alemania reportan el uso de almidón o forraje provenientes del trigo y el maíz, las cuales son materias primas de consumo humano para la producción comercial de bioetanol (Gutiérrez Villanueva et al., 2020). También están los residuos agrícolas, como el bagazo, la paja de arroz y el ras-

trojo de maíz, que se utilizan como materias primas en la industria de pulpa y papel (Mongkhonsiri et al., 2018). Algunos países, como Brasil, emplean la biomasa de caña de azúcar para la producción de biocombustibles (Pazmiñón Sánchez et al., 2017). A nivel global, en algunas investigaciones se observa la utilización de distintos residuos agrícolas como la paja de arroz, cáscara y el rastrojo del maíz, rastrojo o residuos de piña para producir bioetanol (Kumar et al., 2018; Kazemi Shariat Panahi et al., 2020; Chintagunta et al., 2017), así como también la cáscara de naranja para obtener bioplásticos (Gutiérrez Villanueva et al., 2020).

Estas biomasa agrícolas son residuos lignocelulósicos y además de ser un sustrato renovable en comparación con los combustibles fósiles están compuestas principalmente por tres constituyentes: celulosa, hemicelulosa y lignina (Sharma and Saini, 2020). La celulosa es el material polimérico orgánico más común y disponible en el mundo. Se usa frecuentemente para producir materiales de cartón, papel, y también como precursor del bioetanol de segunda generación (Yousuf et al., 2020; Korányi et al., 2020). La hemicelulosa es un heteropolisacárido amorfo, ramificado, compuesto por azúcares de cinco y seis carbonos. La presencia de azúcares reductores en la hemicelulosa es importante como fuente clave para la producción de sustancias químicas (Lorenci Woiciechowski et al., 2020; Mankar et al., 2021).

La lignina es otro componente importante de la biomasa lignocelulósica, y es un biopolímero aromático complejo con alto contenido de carbono. En el procesamiento de biomasa, la lignina es el componente infrautilizado, aunque tiene un enorme potencial como materia prima para las industrias química y de combustibles (Mathew et al., 2018; Korányi et al., 2020). Debido a su composición, los residuos lignocelulósicos tienen la capacidad de ser utilizados en la obtención de bioproductos de alto valor agregado, como ácido láctico, furfural, ácido levulínico, entre otros. (Espinoza-Vázquez et al., 2020).

El interés por el uso de residuos lignocelulósicos y especialmente los de origen agrícola radica en que son materias primas de bajo costo con una gran cantidad de compuestos para su aplicación en biorrefinerías lignocelulosas. Algunas investi-

gaciones reportan que en algunas biorrefinerías a pequeña escala se han utilizado residuos agrícolas para la producción de biogás, xilano, glucosa, etanol y polihidroxialcanoatos (Parralejo et al., 2019; Dos Santos et al., 2017; Clauser et al., 2018).

En países como el Ecuador, la biomasa es abundante por ser un país megadiverso, con actividad agrícola extensa. El año 2020 registró unos 5,20 millones de hectáreas en tierras cultivadas, siendo los principales cultivos la caña de azúcar, el banano y la palma africana (INEC, 2020). Manabí conforma una de las provincias del país con mayor número de actividades económicas relacionadas a la agricultura, con 1,2 millones de hectáreas de labor agrícola, que representan el 15,83% del territorio a nivel nacional. Asimismo, existen pequeños centros de procesamiento agroindustrial, entre las que se encuentran las productoras de snack, harina de plátano, procesadoras de arroz y maíz, además de las industrias de caña de azúcar y café, responsables de la producción de panela, aguardiente, café tostado y molido, respectivamente (Manabí Produce, 2021; Manabí Produce-Ep, 2016).

Esta actividad agrícola y agroindustrial genera residuos caracterizados por ser recursos potencialmente renovables, sustentables, rentables y económicos para la producción de bioenergía (Gupta and Verma, 2015). Es por ello que los subproductos agrícolas, pecuarios y residuales urbanos pueden ser aprovechados en una biorrefinería a pequeña escala (Gómez-Soto et al., 2019). Las biorrefinerías, al basarse en el uso de biomasa residual, contribuyen con la disminución de los costos energéticos y la emisión de gases con efecto invernadero, a la vez que generan energía, materiales y productos químicos (Carmona-Cabello et al., 2018).

Para la fecha en la que se realizó la investigación, además de los centrales azucareros, sólo hay registro de una biorrefinería en el país, específicamente en el campus de Nayón de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Esta instalación se encuentra actualmente en operación, y desarrolla productos como etanol, biogás, biofertilizante, combustible, alimentos para animales, además de otros compuestos químicos de alto valor (Carvajal, 2013; Cevallos, 2018). En la provincia de Manabí no se registra la existencia de un complejo industrial de este tipo, pese a que genera residuos de la

actividad agrícola que realiza (Sumba et al., 2019). La implementación de una biorrefinería a pequeña escala en Manabí daría mayor valor a la actividad agrícola por aprovechamiento de residuos, que en la actualidad están ocasionando un efecto negativo al medio ambiente.

El uso de residuos de origen agrícola como materias primas es una elección prometedora para ofrecer coste añadido y afectar de manera positiva tanto a la economía como al ambiente de la provincia. Una decisión de este tipo requiere el análisis multicriterio, con el fin de evaluar las diversas alternativas y seleccionar la mejor. Existen diversas herramientas que se utilizan para apoyar la toma de decisiones, entre las cuales se encuentra el proceso de jerarquía analítica (AHP).

El AHP se destaca dentro de los métodos de evaluación integral en fuentes renovables de energía, dando a conocer las bases para obtener una correcta elección, valorando el potencial de aprovechamiento de la biomasa desde una perspectiva multicriterio (Jiménez Borges et al., 2019). Actualmente, la selección de biomasa por el método AHP se ha puesto a prueba en varios estudios como la evaluación de sostenibilidad de las principales biomasa en la provincia de Cienfuegos, Cuba, donde el bagazo fue el de mayor contribución energética (Jiménez Borges et al., 2019). Otra aplicación para este método ocurrió en la determinación sistemática del mejor residuo agrícola para la producción de polihidroxialcanoatos (Requiso et al., 2018). Dentro de este contexto, resulta novedoso aplicar el método de AHP para evaluar el uso de subproductos agrícolas en una zona específica del Ecuador, con el fin de ser utilizados como materia prima en una biorrefinería de pequeña escala.

En este sentido, el presente trabajo tiene como objetivo realizar una revisión sobre las biomasa agrícolas generadas en la provincia de Manabí, con el propósito de aplicar un proceso de jerarquía analítica que permita seleccionar los de mayor utilidad para que sean usados como materia prima en una biorrefinería de pequeña escala. El correcto análisis, además de los resultados obtenidos, servirán como un framework para el desarrollo de la bioeconomía en el país.

2 Materiales y Métodos

2.1 Método de análisis multicriterios

Para seleccionar aquellos subproductos con mayor índice de importancia, se utilizó el Proceso de Jerarquía Analítica, que es un método de análisis de decisión desarrollado por Tomas Saaty en 1980, diseñado con el fin de beneficiar la toma de decisiones y proveer un enfoque estructurado para determinar los pesos y ponderaciones de los múltiples criterios y los estandariza para que puedan compararse (Ramírez et al., 2020). La aplicación del método de AHP considera los siguientes pasos (Huamaní Huamaní and Eyzaguirre Tejada, 2015):

- Seleccionar la meta: Consiste en definir el objetivo a alcanzar, para lo cual es necesario disponer de información y experiencia de un experto sobre el tema, para seleccionar criterios y proponer alternativas.
- Establecer la estructura jerárquica: Una vez definida la meta global, criterios y alternativas de solución se propone el modelo Jerárquico.
- Proponer matrices a partir de comparaciones y una escala numérica que corresponde a expresiones verbales comúnmente usadas (Tabla 1).

Tabla 1. Escala de Saaty. Tomado de Saaty (2014).

Escala numérica	Escala verbal
1	Igual importancia.
3	El elemento es moderadamente más importante respecto al otro.
5	El elemento es fuertemente más importante respecto al otro.
7	La importancia del elemento es muy fuerte respecto al otro.
9	La importancia del elemento es extrema respecto al otro.
2, 4, 6, 8	Valores intermedios entre dos juicios adyacentes.
Incrementos 0, 1	Valores intermedios entre incrementos (utilice esta escala si cree que su valoración necesita un grado alto de precisión).

El proceso iterativo se repitió para cada criterio, hasta obtener los resultados que fueron finalmente sometidos a una medida de consistencia. El tamaño de consistencia, λ_{max} se dedujo como un valor propio primordial con base a la técnica del vector propio. Esto se hace calculando la capacidad de multiplicación de la matriz de las calificaciones de los criterios (en la fila de la matriz de comparación por pares) y el promedio normalizado de todos los componentes (dentro de la columna de la matriz normalizada) dividido por el promedio normalizado del criterio (Owolabi et al., 2020). Posteriormente se calcula el Índice de Consistencia (CI) (Luna et al.,

2019), a través de la ecuación 1.

$$CI = \frac{(\lambda_{max} - n)}{(n - 1)} \tag{1}$$

Donde n es el tamaño de la matriz y λ_{max} es el máximo valor. Luego mediante la ecuación 2 se calcula una relación de consistencia (RC), que compara el índice de consistencia (IC) de la matriz con los juicios obtenidos, versus el índice de consistencia (RI) de una matriz aleatoria (Tabla 2).

$$RC = \frac{CI}{RI} \tag{2}$$

Tabla 2. Índice de consistencia. Tomado de Qazi et al. (2018).

Tamaño de la matriz (n)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Índice Aleatorio	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Si el resultado de RC es superior a 0,10 indica que los juicios de la matriz son inconsistentes, y no son aceptables para tomar decisiones. Para valores de RC equivalentes o menores a 0,10, las consistencias son aceptables, válidas y justificadas para la toma de elecciones.

2.2 Alternativas de selección

Las alternativas de selección representaron cada uno de los subproductos agrarios considerados en el estudio, los cuales fueron considerados en base a la información reportada por el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC, 2020), sobre las actividades agrícolas que aportaron mayor producción en el año 2020 para la provincia de Manabí, Ecuador.

En este sentido, se trabajó con los residuos provenientes del café (cascarilla), cacao (cáscara y mucílago), maíz (olote), plátano (cáscara) y caña de azúcar (bagazo), cuyos constituyentes representan ser una fuente prometedora de material lignoceluloso. Adicionalmente, se consultó bibliográficamente el contenido proximal (% de humedad, sólidos volátiles, cenizas y carbono fijo) y elemental (Carbono, Nitrógeno, Hidrógeno, Oxígeno y Azufre) de los diferentes residuos evaluados. Del mismo modo, se consideraron los procesos actualmente aplicados para la biomasa, así como también los distintos productos que se pueden obtener a partir de ellos.

2.3 Selección de criterios para la valoración de las alternativas

El uso de biomasa residual agrícola tiene el potencial de convertirse en gas de síntesis para generar energía o una serie de productos químicos básicos o plataformas, que parte de compuestos como lo son la celulosa, hemicelulosa, almidón, lignina, lípidos, y proteínas.

La conversión de biomasa en productos químicos ofrece diversas oportunidades pero plantea nuevos desafíos tecnológicos, debido a que su compleja estructura requiere tratamientos de conversión para descomponer el material en monosacáridos y generar productos de valor agregado (Kover et al., 2021).

En base a estos señalamientos y teniendo en cuenta lo expuesto en investigaciones previas relacionadas al tema en estudio, se establecieron 5 criterios de selección.

- **Potencial energético:** La biomasa es un recurso energético renovable que no solo aporta energía limpia, sino que también asegura que las fuentes de energía estarán disponibles para las generaciones futuras, siempre que se utilicen de manera sostenible (Morato et al., 2019). Este criterio hace referencia al potencial que tiene el residual para convertirse en energía.
- **Composición:** La composición química de la biomasa lignocelulósica determina su potencial como materia prima de biorrefinería. Siendo la celulosa, hemicelulosa, lignina, contenido proximal y elemental (Jaffar et al., 2020).
- **Rendimiento de biomasa:** Se refiere a la cantidad cosechable de biomasa durante la producción de un determinado cultivo (Cobuloglu and Büyüktaktin, 2015).
- **Costo de procesamiento:** Mide el costo de transformación de la biomasa en una forma de producto o energía utilizable. La biomasa puede procesarse de distintas maneras según el uso final y los productos requeridos, utilizando tecnologías de conversión químicas, térmicas, termoquímicas y bioquímicas (Shahbaz et al., 2020).
- **Impacto ambiental:** La biomasa agrícola se ha considerado un producto potencial para reducir la dependencia de los combustibles fósiles y mitigar los efectos negativos en el medio ambiente (Fantini, 2017). Este criterio evalúa la reducción del impacto ambiental, con la selección de uno de los residuos.

La cantidad de biomasa disponible depende de la producción de cada rubro, así como de la estacionalidad de cada cultivo; sin embargo, estos aspectos no fueron incluidos como criterios de selección, debido a que el interés de la investigación se orientó a evaluar el potencial que tienen los residuos generados en la unidad de estudio para ser utilizados en procesos de biorrefinación en la producción de distintos bioproductos.

2.4 Panel de expertos

Para determinar el peso de los criterios seleccionados, se buscó la opinión de un panel de expertos conformado por 14 profesionales, relacionados directamente con el tema estudiado. Se recomienda que el grupo esté conformado entre 7 y 15 participantes para mantener un nivel de confianza y calificación elevado (Gómez Montoya et al., 2008).

Asimismo, se contó con un formulario de Google estructurado en base al método AHP, en el cual cada uno de los expertos expresó su opinión sobre los subproductos agrarios en función de los criterios de selección establecidos para ser utilizados como materia prima en una biorrefinería de pequeña escala. Una vez que el panel de expertos ponderó los criterios de selección, se llegó a un consenso para la aplicación del AHP.

2.5 Herramientas informáticas utilizadas

Se empleó el software Super Decisions V3.2., una herramienta gratuita de uso educativo desarrollada por Saaty para Procesos de Red Analítica (ANP) y Procesos de Jerarquía Analítica (AHP).

3 Resultados y Discusión

A partir de la bibliografía consultada se conoció la composición lignocelulósica, así como el contenido proximal y elemental (Tabla 3) de los residuos evaluados, los cuales pueden utilizarse como materia prima en la producción de textiles, empaques, esteroides, pulpa de papel, material de construcción, abonos y alimentos. Los materiales lignocelulósicos tienen aplicación en productos de consumo animal y humano. Investigaciones previas han demostrado su uso para la obtención de alcohol, xilosa, xilitol y xilo-oli-gosacaridos (Muñoz-Muñoz et al., 2014).

Los métodos de análisis proximal y elemental (Tabla 3) muestran potencial para reflejar el contenido de energía química de la biomasa, permitiendo la evaluación de la sostenibilidad de las biorrefinerías que coproducen bioaceite, biocarbón, biodiésel, glicerol y bioelectricidad (Aghbashlo et al., 2020).

El análisis elemental o análisis final estima las posibles emisiones de gases contaminantes producidos durante la combustión (Rojas et al., 2018). Por lo general, la biomasa contiene entre 70% y 86% de materia volátil y un bajo contenido de carbón, lo que hace que la biomasa sea un combustible altamente reactivo. Los combustibles con pocos sólidos volátiles pueden provocar combustión sin llama, mientras que un alto contenido de sólidos volátiles puede encenderse fácilmente (Akowuah et al., 2012; Yang et al., 2017). Un mayor contenido de materia volátil en la producción de bioaceite implica una mayor cantidad (Cai et al., 2017). Asimismo, cuanto mayor sea el contenido de carbono fijo, mayor será su temperatura durante el proceso de conversión de energía, ya que este es el combustible que realmente está presente en la biomasa (Palacios Vallejos et al., 2020).

La ceniza de la biomasa puede usarse como fertilizante. Sin embargo, los elementos de las cenizas también pueden causar problemas durante la combustión. Un alto contenido de cenizas conlleva a reducir la eficiencia del proceso, por lo que se prefiere una biomasa con un bajo contenido de cenizas como fuente de combustible (Yang et al., 2017; Zając et al., 2018). La determinación del nivel de humedad es importante porque los altos niveles de humedad pueden causar problemas en la caldera durante los procesos de combustión, mientras que los niveles bajos de humedad pueden acelerar la combustión (Ku Ahmad et al., 2018).

Otro aspecto a considerar es el método de procesamiento por el cual se transforman los residuos. La biomasa es una materia prima compleja, por lo tanto, su conversión a producto final requiere de procesos que se pueden clasificar en cuatro tratamientos principales: físicos, químicos, fisicoquímicos y biológicos para mejorar la accesibilidad a sus biopolímeros en el procesamiento industrial (Orejuela-Escobar et al., 2021; Moreno et al., 2019).

La trituración mecánica y la extrusión son métodos de pretratamiento físico prometedor para la conversión de biomasa (Moreno et al., 2019), y son responsables de la reducción del tamaño de las partículas y aumentan el área superficial de los materiales lignocelulósicos (Kumari and Singh, 2018).

Tabla 3. Composición lignocelulósica, proximal y elemental de los residuos analizados

Biomasa	Cel (%)	Lig (%)	Hemic (%)	Hum (%)	SV (%)	CF (%)	Cn (%)	C (%)	N (%)	H (%)	O (%)	S (%)	Referencias
Cascarilla de café	24,50	23,70	29,70	11,30	72,94	7,76	8,00	39,68	3,01	5,41	51,58	0,32	(Murthy and Madhava Naidu, 2012; Zimla et al., 2021)
Cáscara de cacao	30	35	10	10,91	61,17	19,78	8,14	41,59	1,67	6,18	45,98	0,10	(Martínez-Ángel et al., 2015; Tsai et al., 2020)
Mucílago de cacao	41,68	6,05	21,14	84,71	ND	ND	0,37	66,41	3,44	6,35	18,1	0,05	(Widjaja et al., 2021; Saavedra-Sanabria et al., 2021; González Cabra and Suarez Muñoz, 2018)
Olote de maíz	50	15,80	33,80	10,20	56,77	41,86	1,37	45,69	5,65	6,18	41,65	0,04	(Montiel and Romero, 2015; Kluska et al., 2020)
Cáscara de plátano	13	14	14,80	11,56	88,02	2,70	9,28	35,65	1,94	6,19	45,94	20,75	(Kumar et al., 2016; Kabenge et al., 2018)
Bagazo de caña de azúcar	42,19	21,56	20,60	5,92	81,55	10,91	1,62	45,5	0,80	5,63	48,07	0,21	(Álvarez, 2016; Adeniyi et al., 2019; Zamora Rueda et al., 2015)

Cel: Celulosa, Lig: Lignina, Hemic: Hemicelulosa, Hum: Humedad, SV: Sólidos volátiles, CF: Carbono fijo, Cn: Cenizas, ND: No Determinado

El tratamiento químico es uno de los métodos más prometedores para mejorar la biodegradabilidad de la celulosa mediante la eliminación de lignina y hemicelulosas (Behera et al., 2014). Este a su vez puede clasificarse en alcalino, ácido, con sulfito, organosolv e iónico (Oh et al., 2015).

Estos métodos químicos en la industria del papel se han utilizado para la deslignificación, el cual tiene como objetivo eliminar las fracciones no celulósicas a partir de un tratamiento alcalino (Michelin et al., 2020). La conversión fisicoquímica incluye métodos que combinan cambios físicos y reacciones químicas durante el procesamiento, siendo el pretratamiento fisicoquímico de la biomasa con explosión de vapor uno de los más utilizados. Los procesos de conversión de este tipo conducen a la producción de biocombustibles de alta densidad (Jędrzejczyk et al., 2019).

Los tratamientos biológicos utilizan enzimas u organismos para hidrolizar la celulosa y la hemicelulosa y fermentar las moléculas de azúcar (Kumari and Singh, 2018). El propósito es producir biocombustibles, así como diferentes tipos de productos químicos como biogás, hidrógeno, etanol, butanol,

acetona, etc. Comúnmente se prefiere la biomasa con un alto porcentaje de materia orgánica biodegradable y alto contenido de humedad. Los procesos más utilizados de este tipo son la digestión anaeróbica y la fermentación (Zinla et al., 2021; Garba, 2020).

El procesamiento a escala industrial de la biomasa se realiza con una combinación de los procesos descritos, en función del diseño del sistema de producción y de los productos que se esperan obtener. Atendiendo a lo descrito y con el propósito de seleccionar el subproducto agrícola con mayor importancia para su aprovechamiento en la instalación de una biorrefinería, se aplicó el proceso de jerarquía analítica. Para ello, se comenzó con la elaboración de una estructura jerárquica multinivel que relaciona los criterios y alternativas de selección (Figura 1). Las matrices normalizadas para cada criterio de selección se obtuvieron con la ponderación dada por el panel de expertos (Ver Anexos).

Posteriormente, se obtuvo la matriz normalizada de los criterios seleccionados (Tabla 4), la prioridad de las alternativas (Tabla 5) y la razón de consistencia de cada criterio (Tabla 6).

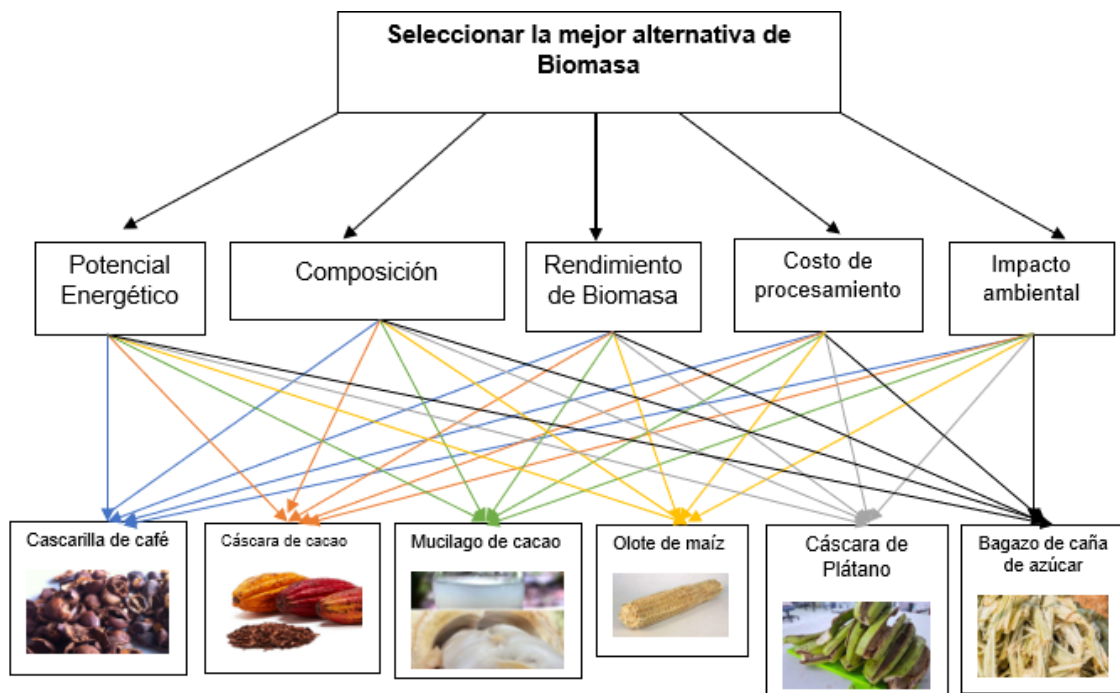


Figura 1. Estructura jerárquica de la selección de los subproductos agrarios de la provincia de Manabí.

Los resultados obtenidos indican que entre los subproductos evaluados, el mejor fue el bagazo de caña de azúcar con un vector de prioridad del 33,20%, seguido de la cascarilla de café con un 26,10%, siendo estas dos biomásas las que mejor se desempeñan como materia prima en una biorrefinería de pequeña escala dentro del contexto analizado. En cuanto a los criterios evaluados, la composición y el impacto ambiental predominan sobre el resto, infiriendo la posibilidad de emplear residuos con contenido lignocelulósico como lo es la caña de azúcar.

En una investigación similar, se evaluó la sostenibilidad de distintas biomásas (residuos agrícolas de cosecha y forestales), a través de herramientas de economía ecológica, entre las que se incluyó el AHP. Los resultados obtenidos con el análisis multicriterios arrojaron que el bagazo de caña de azúcar (Jiménez et al., 2020), con un vector de prioridad de 0,57, es el de mayor contribución energética. En términos de energía, el bagazo de caña de azúcar representa una de las fuentes más grandes de bioenergía (Amezcuza-Allieri et al., 2019). Los resultados obtenidos tienen un índice de consistencia igual o menor a 0,10, lo que significa que las consistencias fueron aceptables y válidas para la toma de decisiones.

La principal razón para tener preferencia relativamente más alta por el bagazo de caña de azúcar se debe a que es un residuo agrícola rico en polisacáridos, convirtiéndose en una materia prima prometedora para la obtención de biocombustibles y otros químicos, bajo un concepto de biorrefinería. La gestión adecuada de los recursos de este desperdicio crea así una oportunidad para generar ingresos adicionales (Konde et al., 2021; Restrepo-Serna et al., 2018).







El bagazo de caña de azúcar en procesos biotecnológicos puede utilizarse como fuente de carbono para producir etanol de segunda generación, xilitol, biogás, además de productos plataforma como la glucosa y la xilosa, de los cuales pueden obtenerse otros de alto valor (Antunes et al., 2021; Nosratpour et al., 2018). En los últimos años, el ácido succínico, sustancia química de valor agregado, puede derivarse del bagazo de caña de azúcar y se ha investigado como coproducto para las biorrefinerías (Nieder-Heitmann et al., 2019). Asimismo, este residual puede utilizarse en procesos de fermentación para obtener compuestos como butanol, ácido láctico y poli-3-hidroxibutirato (PHB), siendo estos identificados para incluirlos en la gama de biorrefinerías multiproducto (Restrepo-Serna et al., 2018).

Tabla 4. Matriz normalizada de los criterios seleccionados.

Criterio	PE	C	RB	CP	IA	Normal	Ideal
PE	1	0,33	0,2	1	0,33	0,074	0,221
C	3	1	3	5	1	0,334	1
RB	5	0,33	1	5	0,33	0,202	0,606
CP	1	0,2	0,2	1	0,2	0,057	0,171
IA	3	1	3	5	1	0,334	1

PE: Potencial energético, C: Composición, RB: Rendimiento de la biomasa, CP: Costo de procesamiento, IA: Impacto ambiental

Tabla 5. Prioridad de alternativas.

Gráfico	Alternativas	Total	Normal	Ideal	Clasificación
	1 Cascarilla de café	0,131	0,261	0,787	2
	2 Cáscara de cacao	0,103	0,205	0,618	3
	3 Mucílago de cacao	0,021	0,042	0,125	5
	4 Olote de maíz	0,021	0,041	0,125	6
	5 Cáscara de plátano	0,059	0,118	0,355	4
	6 Bagazo de caña de azúcar	0,166	0,332	1	1

En segundo lugar, se encuentra la cascarilla de café, cuyo interés surge debido a su alto valor potencial. Debido a su composición rica en polisacáridos, junto con un número significativo de otras biomoléculas activas, es posible obtener productos de valor agregado a partir de esta biomasa (Oliveira et al., 2021; Mora-Villalobos et al., 2021).

Tabla 6. Razón de consistencia obtenida en los criterios.

Matriz	RC
Potencial energético	0,103
Composición	0,096
Rendimiento de biomasa	0,099
Costo de procesamiento	0,088
Impacto ambiental	0,093

A partir de la cascarilla de café se puede obtener bioproductos que incluyen ácido cítrico, ácido láctico, polihidroxialcanoatos, biocombustible, cosméticos, entre otros (Aristizábal-Marulanda et al., 2017; Iriondo-DeHond et al., 2020). Por otro lado, también se ha propuesto la cascarilla de café para su uso como relleno en matrices poliméricas por ser una alternativa potencial de bajo costo. Asimismo, destacando su alto contenido de celulosa, hemicelulosa y alto poder calorífico, es una materia prima prometedora para producir bioenergía (Rambo et al., 2015; Sisti et al., 2021).

4 Conclusiones

La aplicación de un proceso de jerarquía analítica permitió identificar la mejor opción de biomasa para ser utilizada como materia prima en una biorrefinería a pequeña escala, en la provincia de Manabí. Los criterios con mayor importancia en la evaluación fueron la composición de la materia prima y el impacto ambiental, los cuales recibieron igual peso global entre todos los evaluados. Mediante el análisis multicriterios, se determinó que el bagazo de caña de azúcar es la alternativa más prometedora respecto al resto de las biomásas estudiadas. De este modo, este residual agrícola representa una alternativa de interés para el progreso bioeconómico del país, puesto que genera oportunidades para el desarrollo de nuevos productos y con ello de participación en el mercado global. Los residuos lignocelulósicos son fuentes renovables, y su composición

y propiedades estructurales tienen efectos significativos en su conversión dentro de una perspectiva de procesamiento de biorrefinería. El conocimiento de la composición en los residuos permite predecir el tipo de tratamiento a aplicar para obtener una amplia gama de bioproductos.

Contribución de los autores

J.M.S.B.: Investigación, metodología, escritura- borrador original, visualización. G.A.Z.V.: Investigación, metodología, escritura- borrador original, visualización. R.E.C.C.: Validación. M.A.R.: Conceptualización, supervisión, validación, escritura- revisión y edición.

Referencias

- Adeniyi, A. G., Ighalo, J. O., and Abdulsalam, A. (2019). Modeling of integrated processes for the recovery of the energetic content of sugar cane bagasse. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 13(4):1057–1067. Online:https://n9.cl/9u5n2.
- Aghbashlo, M., Tabatabaei, M., Nadian, M. H., Soltanian, S., Ghasemkhani, H., Shafizadeh, A., and Lam, S. S. (2020). Determining biomass chemical exergy using a novel hybrid intelligent approach to promote biomass-based biorefineries. *Journal of Cleaner Production*, 277:124089. Online:https://n9.cl/w57br.
- Akowuah, J. O., Kemausuor, F., and Mitchual, S. J. (2012). Physico-chemical characteristics and market potential of sawdust charcoal briquette. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 3(20):1–6. Online:https://n9.cl/ujw6fh.
- Álvarez, A. (2016). Caracterización fisicoquímica de varios residuos agroindustriales y sus mezclas para la producción de biocombustible.
- Amezcuza-Allieri, M. A., Martínez-Hernández, E., Anaya-Reza, O., Melgarejo-Flores, L. A., Palmerín-Ruiz, M. E., Eguía-Lis, J. A. Z., Rosas-Molina, A., Enríquez-Poy, M., and Aburto, J. (2019). Techno-economic analysis and life cycle assessment for energy generation from sugarcane bagasse: Case study for a sugar mill in Mexico. *Food and Bioproducts Processing*, 118:281–292. Online:https://n9.cl/xdnad.

- Antunes, F. A. F., Thomé, L. C., Santos, J. C., Ingle, A. P., Costa, C. B., Dos Anjos, V., Bell, M. J. V., Rosa, C. A., and Da Silva, S. S. (2021). Multi-scale study of the integrated use of the carbohydrate fractions of sugarcane bagasse for ethanol and xylitol production. *Renewable Energy*, 163:1343–1355. Online:https://n9.cl/g6pau.
- Aristizábal-Marulanda, V., Chacón-Perez, Y., and Cardona Alzate, C. A. (2017). Chapter 3 - the biorefinery concept for the industrial valorization of coffee processing by-products. In *Handbook of Coffee Processing By-Products: Sustainable Applications*, volume 10, pages 63–92. Online:https://n9.cl/m78f6.
- Behera, S., Arora, R., Nandhagopal, N., and Kumar, S. (2014). Importance of chemical pretreatment for bioconversion of lignocellulosic biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 36:91–106. Online:https://n9.cl/clkwh.
- Birner, R. (2018). *Bioeconomy concepts*, pages 17–38. Online:https://n9.cl/wjd4pa. Springer.
- Cai, J., He, Y., Yu, X., Banks, S. W., Yang, Y., Zhang, X., Yu, Y., Liu, R., and Bridgwater, A. V. (2017). Review of physicochemical properties and analytical characterization of lignocellulosic biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76:309–322. Online:https://n9.cl/homjx.
- Carmona-Cabello, M., Garcia, I. L., Leiva-Candia, D., and Dorado, M. P. (2018). Valorization of food waste based on its composition through the concept of biorefinery. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 14:67–79. Online:https://n9.cl/lm2f3d.
- Carvajal, J. (2013). Centro neotropical para investigación de la biomasa, centro neotropical para investigación de la biomasa. CNIB. Online:https://n9.cl/womvc.
- Cevallos, A. (2018). La puce desarrolla desinfectantes, agua pura y refrescante en su biorrefinería en el campus de nayón para ayuda a los damnificados -sede ibarra, pontificia universidad católica del ecuador. PUCE.
- Chintagunta, A. D., Ray, S., and Banerjee, R. (2017). An integrated bioprocess for bioethanol and bio-manure production from pineapple leaf waste. *Journal of Cleaner Production*, 165:1508–1516. Online:https://n9.cl/siu9n.
- Clauser, N. M., Gutiérrez, S., Area, M. C., Felissia, F. E., and Vallejos, M. E. (2018). Alternatives of small-scale biorefineries for the integrated production of xylitol from sugarcane bagasse. *Journal of Renewable Materials*, 6(2):139–151. Online:https://n9.cl/xuxgzw.
- Cobuloglu, H. I. and Büyüktaktakin, I. E. (2015). A stochastic multi-criteria decision analysis for sustainable biomass crop selection. *Expert Systems with Applications*, 42(15-16):6065–6074. Online:https://n9.cl/fo88hd.
- Dos Santos, A. M., Dos Santos, A. M., Zepka, L. Q., and Jacob-Lopes, E. (2017). Downstream recovery of microalgal bioproducts with highlights on biorefineries. *Biorefineries: Concepts, Advancements and Research*, pages 1–38. Online:https://n9.cl/feh0go.
- Espinoza-Vázquez, Y. M., Gómez-Castro, F. I., and Ponce-Ortega, J. M. (2020). Supply chain optimization for the production of biofuels and bioproducts from lignocellulosic biomass in Mexico. *Computer Aided Chemical Engineering*, 48:1339–1344. Online:https://n9.cl/1kkxw.
- Fantini, M. (2017). *Biomass Availability, Potential and Characteristics*, volume 57, pages 21–54. Online:https://n9.cl/zk0fm. Springer.
- Garba, A. (2020). *Biomass Conversion Technologies for Bioenergy Generation: An Introduction, Biotechnological Applications of Biomass*. IntechOpen. Online:https://n9.cl/rj9gr.
- Gómez Montoya, D., Méndez Giraldo, G. A., Méndez Morales, E., Ortiz Chavarro, G., and Turriago Hoyos, I. (2008). Metodología basada en proceso de jerarquía analítica (ahp) para seleccionar cadenas productivas que buscan soluciones de automatización a bajo costo. *Ingeniería (Bogotá)*, 13(1):15–26. Online:https://n9.cl/2kqx2.
- Gómez-Soto, J. A., Sánchez-Toro, J., and Matallana-Pérez, L. G. (2019). Residuos urbanos, agrícolas y pecuarios en el contexto de las biorrefinerías. *Revista Facultad de Ingeniería*, 28(53):7–32. Online:https://n9.cl/2iis7.
- González Cabra, A. J. and Suarez Muñoz, F. (2018). Potencial de producción de biometano y biohidrógeno a partir de residuos agrícolas: mucílago de café y cacao y estiércol de cerdo.

- Gupta, A. and Verma, J. P. (2015). Sustainable bioethanol production from agro-residues: A review. *Renewable and Sustainable Energy*, 41:550–567. Online: <https://n9.cl/5qhty>.
- Gutiérrez Villanueva, A., Guirola Céspedes, C., de Armas Martínez, A. C., Albernas Carvajal, Y., and Villanueva Ramos, G. (2020). Valorización de la lignina en el concepto de biorrefinería (i). *Centro Azúcar*, 47(3):95–105. Online: <https://n9.cl/7s8xr>.
- Hernández Benítez, R. and Céspedes Rangel, J. (2019). Biorrefinería: una oportunidad energética para el desarrollo bioeconómico de la guajira. *Renovat: Revista de Estudios Interdisciplinarios en Ciencias Sociales, Tecnología e Innovación*, 3(2):38–51. Online: <https://n9.cl/g1yup2>.
- Huamaní Huamaní, G. and Eyzaguirre Tejada, R. (2015). Modelo de aplicación de ahp para seleccionar editor de contenidos de objetos de aprendizaje (modelo paja - ecoa). *Industrial Data*, 18(2):121–125. Online: <https://n9.cl/pz4h2>.
- INEC (2020). Encuesta de superficie y producción agropecuaria continua. Technical report, Instituto Nacional de Estadísticas y Censos.
- Iriondo-DeHond, A., Iriondo-DeHond, M., and del Castillo, M. D. (2020). Applications of compounds from coffee processing by-products. *Biomolecules*, 10(9):1219. Online: <https://n9.cl/97tuv>.
- Jaffar, M. M., Nahil, M. A., and Williams, P. T. (2020). Pyrolysis-catalytic hydrogenation of cellulose-hemicellulose-lignin and biomass agricultural wastes for synthetic natural gas production. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 145:104753. Online: <https://n9.cl/jngsk>.
- Jędrzejczyk, M., Soszka, E., Czapnik, M., Ruppert, A. M., and Grams, J. (2019). Physical and chemical pretreatment of lignocellulosic biomass. In *Second and Third Generation of Feedstocks: The Evolution of Biofuels*, pages 143–196. Online: <https://n9.cl/6whw8>.
- Jiménez, R., López Bastida, E. J., Bravo Amarante, E., Álvarez González, A. L., and Hernández Nardarse, M. T. (2020). Evaluación de la sostenibilidad para la biomasa cañera a partir del método ahp. *Universidad Y Sociedad*, 12(1):73–79. Online: <https://n9.cl/pvhom2>.
- Jiménez Borges, R., Álvarez González, A. L., López Bastida, E. J., and Bermúdez Chou, A. d. I. C. (2019). Herramientas de economía ecológica para la evaluación de la sostenibilidad de biomásas. *Revista de Investigación*, 12(2):151–164. Online: <https://n9.cl/yrvak>.
- Kabenge, I., Omulo, G., Banadda, N., Seay, J., Zziwa, A., and Kiggundu, N. (2018). Characterization of banana peels wastes as potential slow pyrolysis feedstock. *Journal of Sustainable Development*, 11(2):14–24. Online: <https://n9.cl/kp2d7>.
- Katakajwala, R. and Mohan, S. V. (2021). A critical view on the environmental sustainability of biorefinery systems. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 27:100392. Online: <https://n9.cl/o7n09>.
- Kazemi Shariat Panahi, H., Dehghani, M., Aghbashlo, M., Karimi, K., and Tabatabaei, M. (2020). Conversion of residues from agro-food industry into bioethanol in Iran: An under-valued biofuel additive to phase out mtbe in gasoline. *Renewable Energy*, 145:699–710. Online: <https://n9.cl/h5tav>.
- Kluska, J., Ochnio, M., and Kardaś, D. (2020). Carbonization of corncobs for the preparation of barbecue charcoal and combustion characteristics of corncob char. *Waste Management*, 105:560–565. Online: <https://n9.cl/hrzi8>.
- Konde, K. S., Nagarajan, S., Kumar, V., Patil, S. V., and Ranade, V. V. (2021). Sugarcane bagasse based biorefineries in India: Potential and challenges. *Sustainable Energy and Fuels*, 5(1):52–78. Online: <https://n9.cl/g3zkn>.
- Korányi, T. I., Fridrich, B., Pineda, A., and Barta, K. (2020). Development of “lignin-first” approaches for the valorization of lignocellulosic biomass. *Molecules*, 25(12):2815. Online: <https://n9.cl/iz0cj>.
- Kover, A., Kraljić, D., Marinaro, R., and Rene, E. R. (2021). Processes for the valorization of food and agricultural wastes to value-added products: recent practices and perspectives. *Systems Microbiology and Biomanufacturing*, 2:50–66. Online: <https://n9.cl/ms99q>.
- Ku Ahmad, K., Sazali, K., and Kamarolzaman, A. A. (2018). Characterization of fuel briquettes from banana tree waste. *Materials Today: Proceedings*, 5(10):21744–21752. Online: <https://n9.cl/whkegt>.

- Kumar, A., Gautam, A., and Dutt, D. (2016). Biotechnological transformation of lignocellulosic biomass into industrial products: An overview. *Advances in Bioscience and Biotechnology*, 7(3):149–168. Online: <https://n9.cl/5bfmw>.
- Kumar, A. K., Sharma, S., Shah, E., and Patel, A. (2018). Technical assessment of natural deep eutectic solvent (nades) mediated biorefinery process: A case study. *Journal of Molecular Liquids*, 260:313–322. Online: <https://n9.cl/d3mys>.
- Kumari, D. and Singh, R. (2018). Pretreatment of lignocellulosic wastes for biofuel production: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90:877–891. Online: <https://n9.cl/f8qfqp>.
- Lorenci Woiciechowski, A., Neto, C. J. D., de Souza Vandenberghe, L. P., de Carvalho Neto, D. P., Sydney, A. C. N., Letti, L. A. J., Karp, S. G., Zevallos Torres, L. A., and Soccol, C. R. (2020). Lignocellulosic biomass: Acid and alkaline pretreatments and their effects on biomass recalcitrance – conventional processing and recent advances. *Bioresource Technology*, 304:122848. Online: <https://n9.cl/a8l6s>.
- Luna, K., Guanin, J., and Cordero, G. (2019). Aplicación de un proceso analítico jerárquico (ahp) para mejorar la gestión de inventarios en cadenas de abastecimientos. *Ecuadorian Science Journal*, 3(2):25–32. Online: <https://n9.cl/ooveb>.
- Manabí Produce (2021). Manabí produce archivos - gobierno de manabí ecuador. Manabí PRODUCE. Online: <https://n9.cl/vub7v7>.
- Manabí Produce-Ep (2016). Manabí produce. Manabí PRODUCE.
- Mankar, A. R., Pandey, A., Modak, A., and Pant, K. K. (2021). Pretreatment of lignocellulosic biomass: A review on recent advances. *Bioresource Technology*, 334:125235. Online: <https://n9.cl/wz9mm>.
- Martínez-Ángel, J. D., Villamizar-Gallardo, R. A., and Ortíz-Rodríguez, O. O. (2015). Caracterización y evaluación de la cáscara de mazorca de cacao (*Theobroma cacao* L.) como fuente de energía renovable. *Agrociencia*, 49(3):329–345. Online: <https://n9.cl/jvifo>.
- Mathew, A. K., Abraham, A., Mallapureddy, K. K., and Sukumaran, R. K. (2018). Lignocellulosic biorefinery wastes, or resources? In *Waste Biorefinery*, pages 267–297. Online: <https://n9.cl/35ysd>. Elsevier.
- Michelin, M., Gomes, D. G., Romani, A., Polizeli, M. D. L. T., and Teixeira, J. A. (2020). Nanocellulose production: Exploring the enzymatic route and residues of pulp and paper industry. *Molecules*, 25(15):3411. Online: <https://n9.cl/ell0n>.
- Mongkhonsiri, G., Gani, R., Malakul, P., and Assabumrungrat, S. (2018). Integration of the biorefinery concept for the development of sustainable processes for pulp and paper industry. *Computers and Chemical Engineering*, 119:70–84. Online: <https://n9.cl/580ru>.
- Montiel, K. and Romero, L. (2015). Obtención de bioetanol a partir de la coronta (olote) del maíz variedad hs-5, por el método de hidrólisis ácida diluida - fermentación separada, laboratorios de química.
- Mora-Villalobos, J. A., Aguilar, F., Carballo-Arce, A. F., Vega-Baudrit, J. R., Trimino-Vazquez, H., Villegas-Peñaranda, L. R., Stöbener, A., Eixenberger, D., Bubenheim, P., Sandoval-Barrantes, M., and Liese, A. (2021). Tropical agroindustrial biowaste revalorization through integrative biorefineries—review part i: coffee and palm oil by-products. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13:1469–1487. Online: <https://n9.cl/razmga>.
- Morato, T., Vaezi, M., and Kumar, A. (2019). Assessment of energy production potential from agricultural residues in Bolivia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 102:14–23. Online: <https://n9.cl/zwl8c9>.
- Moreno, A. D., Tomás-Pejó, E., Ballesteros, M., and Negro, M. J. (2019). Pretreatment technologies for lignocellulosic biomass deconstruction within a biorefinery perspective. In *Biomass, Biofuels, Biochemicals: Biofuels: Alternative Feedstocks and Conversion Processes for the Production of Liquid and Gaseous Biofuels*, pages 379–399. Online: <https://n9.cl/8mbtr3>.
- Muñoz-Muñoz, D., Pantoja-Matta, A. J., and Cuatín-Guarín, M. F. (2014). Aprovechamiento de residuos agroindustriales como biocombustible y

- biorefinería. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 12(2):10–19. Online:https://n9.cl/5b9a6.
- Murthy, P. S. and Madhava Naidu, M. (2012). Sustainable management of coffee industry by-products and value addition - a review. *Resources, Conservation and Recycling*, 66:45–58. Online:https://n9.cl/55t7te.
- Navarrete Loza, M. C. and Saavedra Cuadrado, E. K. (2014). Análisis y comparación económica de la crisis del auge petrolero ecuatoriano en relación a los periodos de 1970 y 2000.
- Nieder-Heitmann, M., Haigh, K., and Görgens, J. F. (2019). Process design and economic evaluation of integrated, multi-product biorefineries for the co-production of bio-energy, succinic acid, and polyhydroxybutyrate (phb) from sugarcane bagasse and trash lignocelluloses. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 13(3):599–617. Online:https://n9.cl/k6bewl.
- Nosratpour, M. J., Karimi, K., and Sadeghi, M. (2018). Improvement of ethanol and biogas production from sugarcane bagasse using sodium alkaline pretreatments. *Journal of Environmental Management*, 226:329–339. Online:https://n9.cl/e120g.
- Oh, Y. H., Eom, I. Y., Joo, J. C., Yu, J. H., Song, B. K., Lee, S. H., Hong, S. H., and Park, S. J. (2015). Recent advances in development of biomass pretreatment technologies used in biorefinery for the production of bio-based fuels, chemicals and polymers. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 32:1945–1959. Online:https://n9.cl/86d5t5.
- Oliveira, G., Ferreira, P., Coimbra, M. A., and Gonçalves, I. (2021). Coffee by-products and their suitability for developing active food packaging materials. *Foods*, 10(3):683. Online:https://n9.cl/ji3qf.
- Orejuela-Escobar, L. M., Landázuri, A. C., and Goodell, B. (2021). Second generation biorefining in Ecuador: Circular bioeconomy, zero waste technology, environment and sustainable development: The nexus. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, 6(2):83–107. Online:https://n9.cl/5qisge.
- Owolabi, S. T., Madi, K., Kalumba, A. M., and Ori-moloye, I. R. (2020). A groundwater potential zone mapping approach for semi-arid environments using remote sensing (rs), geographic information system (gis), and analytical hierarchical process (ahp) techniques: a case study of buffalo catchment, eastern cape, south africa. *African Journal of Geosciences*, 13(1184). Online:https://n9.cl/kqrhs.
- Palacios Vallejos, K. Y., Romero, M. A., and Rosero, E. A. (2020). Estimación de las propiedades físico-químicas de residuos agroindustriales para el aprovechamiento como biocombustible. *Revista de Investigaciones en Energía, Medio Ambiente y Tecnología: RIEMAT*, 4(2):28. Online:https://n9.cl/8au0o.
- Parralejo, A. I., Royano, L., González, J., and González, J. F. (2019). Small scale biogas production with animal excrement and agricultural residues. *Industrial Crops and Products*, 131:307–314. Online:https://n9.cl/d4d4w.
- Pazmiñon Sánchez, J., Vargas García, Y., and Dávila Rincón, J. (2017). Perspectivas de las biorefinerías y situación actual de los biocombustibles en Ecuador como país emergente. *Perfiles Revista Científica*, 2(18):51–76. Online:https://n9.cl/dc9jcp.
- Qazi, W. A., Abushammala, M. F., and Azam, M. H. (2018). Multi-criteria decision analysis of waste-to-energy technologies for municipal solid waste management in sultanate of oman. *Waste Management and Research*, 36(7):594–605. Online:https://n9.cl/an1kai.
- Rambo, M. K. D., Schmidt, F. L., and Ferreira, M. M. C. (2015). Analysis of the lignocellulosic components of biomass residues for biorefinery opportunities. *Talanta*, 144:696–703. Online:https://n9.cl/moss0.
- Ramírez, G., Álvarez Aros, E., and Nuño De La Parra, P. (2020). Proceso analítico jerárquico y selección estratégica de proveedores: un estudio bibliométrico. *Revista Espacios*, 41(29):255–272. Online:https://n9.cl/gi0fu.
- Redondo-Gómez, C., Rodríguez Quesada, M., Vallejo Astúa, S., Murillo Zamora, J. P., and Lopretti, M. y Vega-Baudrit, J. R. (2020). Biorefinery of biomass of agro-industrial banana waste to obtain high-value biopolymers. *Molecules*, 25(17):1–13. Online:https://n9.cl/o7k0p.

- Requiso, P. J., Nayve Jr, A. C., Ventura, R., Escobar, E., and Ventura, J. (2018). Agricultural residue feedstock selection for polyhydroxyalkanoates production using ahp-gra. *Philippine Journal of Science*, 147(4):693–704. Online:https://n9.cl/ih916.
- Restrepo-Serna, D. L., Martínez-Ruano, J. A., and Cardona-Alzate, C. A. (2018). Energy efficiency of biorefinery schemes using sugarcane bagasse as raw material. *Energies*, 11(12):1–12. Online:https://n9.cl/qvilgj.
- Rojas, A. F., Flórez, C., and López, D. F. (2018). Use prospects of some agroindustrial waste. *Revista Cubana de Química*, 31(1):31–51. Online:https://n9.cl/unwo9.
- Saaty, T. L. (2014). *Toma De Decisiones para Líderes*. Edición Kindle. Online:https://n9.cl/3r5pr.
- Saavedra-Sanabria, O. L., Durán, D., Cabezas, J., Hernández, I., Blanco-Tirado, C., and Combariza, M. Y. (2021). Cellulose biosynthesis using simple sugars available in residual cacao mucilage exudate. *Carbohydrate Polymers*, 274:1–12. Online:https://n9.cl/fas5x.
- Shahbaz, M., Al-Ansari, T., Aslam, M., Khan, Z., Inayat, A., Athar, M., Naqvi, S. R., Ahmed, S. A., and McKay, G. (2020). A state of the art review on biomass processing and conversion technologies to produce hydrogen and its recovery via membrane separation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(30):15166–15195. Online:https://n9.cl/zq6a84.
- Sharma, D. and Saini, A. (2020). *Lignocellulosic Waste Valorization and Biorefineries Concept*, volume 1, pages 195–215. Online:https://n9.cl/t8pf7g. Springer.
- Sisti, L., Celli, A., Totaro, G., Cinelli, P., Signori, F., Lazzeri, A., Bikaki, M., Corvini, P., Ferri, M., Tassoni, A., and Navarini, L. (2021). Monomers, materials and energy from coffee by-products: A review. *Sustainability*, 13(12):6921. Online:https://n9.cl/2hfkd.
- Sumba, E. F. S., Cantos, J. A. M., and Intriago, G. F. C. (2019). Sugar cane and its environmental impact in conton junin, province of manabí. *International Journal of Life Sciences*, 3(2):1–7. Online:https://n9.cl/ly735.
- Tsai, W. T., Bai, Y. C., Lin, Y. Q., Lai, Y. C., and Tsai, C. H. (2020). Porous and adsorption properties of activated carbon prepared from cocoa pod husk by chemical activation. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 10(1):35–43. Online:https://n9.cl/tq354.
- Widjaja, T., Nurkhamidah, S., Altway, A., Rohmah, A. A., and Saepulah, F. (2021). Chemical pretreatments effect for reducing lignin on cocoa pulp waste for biogas production. In *4Th International Seminar on Chemistry*, volume 2349, page 020058. Online:https://n9.cl/devqw.
- Yang, X., Wang, H., Strong, P. J., Xu, S., Liu, S., Lu, K., Sheng, K., Guo, J., Che, L., He, L., Ok, Y. S. Yuan, G., Shen, Y., and Chen, X. (2017). Thermal properties of biochars derived from waste biomass generated by agricultural and forestry sectors. *Energies*, 10(4):469. Online:https://n9.cl/wnfq3.
- Yousuf, A., Pirozzi, D., and Sannino, F. (2020). Fundamentals of lignocellulosic biomass. In *Lignocellulosic Biomass to Liquid Biofuels*, pages 1–15. Online:https://n9.cl/f661v. Academic Press.
- Zajac, G., Szyszlak-Bargłowicz, J., Gołębowski, W., and Szczepanik, M. (2018). Chemical characteristics of biomass ashes. *Energies*, 11(11):2885. Online:https://n9.cl/w2zdft.
- Zamora Rueda, G. H., Mistretta, M. G., Peralta, F. L., Gutiérrez, C. E., Feijóo, E. A., Golato, M. A., and Paz, D. (2015). Caracterización energética del residuo agrícola de cosecha de caña de azúcar (rac) de tucumán, argentina. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, 36:49–55. Online:https://n9.cl/rb2u7.
- Zinla, D., Gbaha, P., Koffi, P. M. E., and Koua, B. K. (2021). Characterization of rice, coffee and cocoa crops residues as fuel of thermal power plant in côte d'ivoire. *Fuel*, 283:119250. Online:https://n9.cl/nykge.

Apéndice

Tabla A 1. Matriz normalizada del criterio potencial energético.

	Cascarilla de café	Cáscara de cacao	Mucílago de cacao	Olote de maíz	Cáscara de plátano	Bagazo de caña de azúcar	Normal	Ideal
Cascarilla de café	1	5	5	5	5	0,2	0,246	0,495
Cáscara de cacao	0,2	1	1	0,333	0,2	0,143	0,036	0,073
Mucílago de cacao	0,2	1	1	0,333	0,333	0,143	0,039	0,078
Olote de maíz	0,2	3	3	1	0,333	0,143	0,068	0,137
Cáscara de plátano	0,2	5	3	3	1	0,2	0,115	0,231
Bagazo de caña de azúcar	5	7	7	7	5	1	0,497	1

Tabla A 2. Matriz normalizada del criterio de composición

	Cascarilla de café	Cáscara de cacao	Mucílago de cacao	Olote de maíz	Cáscara de plátano	Bagazo de caña de azúcar	Normal	Ideal
Cascarilla de café	1	0,333	7	7	5	1	0,231	0,53
Cáscara de cacao	3	1	7	5	5	5	0,435	1
Mucílago de cacao	0,143	0,143	1	1	0,333	0,143	0,035	0,079
Olote de maíz	0,143	0,2	1	1	1	0,143	0,046	0,107
Cáscara de plátano	0,2	0,2	3	1	1	1	0,081	0,187
Bagazo de caña de azúcar	1	0,2	7	7	1	1	0,172	0,397

Tabla A 3. Matriz normalizada del criterio de rendimiento de biomasa

	Cascarilla de café	Cáscara de cacao	Mucílago de cacao	Olote de maíz	Cáscara de plátano	Bagazo de caña de azúcar	Normal	Ideal
Cascarilla de café	1	5	7	7	3	0,2	0,234	0,471
Cáscara de cacao	0,2	1	3	5	0,333	0,143	0,075	0,150
Mucílago de cacao	0,143	0,333	1	1	0,2	0,143	0,033	0,067
Olote de maíz	0,143	0,2	1	1	0,2	0,143	0,032	0,064
Cáscara de plátano	0,333	3	5	5	1	0,2	0,129	0,260
Bagazo de caña de azúcar	5	7	7	7	5	1	0,497	1

Tabla A 4. Matriz normalizada del criterio de costo de procesamiento

	Cascarilla de café	Cáscara de cacao	Mucílago de cacao	Olote de maíz	Cáscara de plátano	Bagazo de caña de azúcar	Normal	Ideal
Cascarilla de café	1	1	1	5	1	0,333	0,148	0,401
Cáscara de cacao	1	1	3	9	7	3	0,370	1
Mucílago de cacao	1	0,333	1	3	3	0,333	0,117	0,317
Olote de maíz	0,2	0,111	0,333	1	1	0,143	0,037	0,101
Cáscara de plátano	1	0,143	0,333	1	1	0,2	0,060	0,161
Bagazo de caña de azúcar	3	0,333	3	7	5	1	0,267	0,721

Tabla A 5. Matriz normalizada del criterio de impacto ambiental

	Cascarilla de café	Cáscara de cacao	Mucílago de cacao	Olote de maíz	Cáscara de plátano	Bagazo de caña de azúcar	Normal	Ideal
Cascarilla de café	1	7	9	5	3	1	0,328	0,875
Cáscara de cacao	0,143	1	1	5	0,2	0,143	0,063	0,169
Mucílago de cacao	0,111	1	1	1	0,2	0,143	0,040	0,106
Olote de maíz	0,2	0,2	1	1	0,2	0,143	0,036	0,097
Cáscara de plátano	0,333	5	5	5	1	0,2	0,158	0,421
Bagazo de caña de azúcar	1	7	7	7	5	1	0,375	1



OBTENCIÓN DE BIOETANOL A PARTIR DE LA CÁSCARA DE CACAO (*THEOBROMA CACAO*) USANDO *TRICHODERMA REESEI* Y *TRICHODERMA GHANENSE* PARA LA HIDRÓLISIS ENZIMÁTICA.

OBTAINING BIOETHANOL FROM COCOA SHELLS (*THEOBROMA CACAO*) USING
TRICHODERMA REESEI AND *TRICHODERMA GHANENSE* FOR ENZYMATIC
HYDROLYSIS.

Joel Eduardo Vielma-Puente¹, Tatiana Zamora Zamora^{*2}, Luis Lenin
Galarza Romero^{3,4}, Meribary Margarita Monsalve², Joan Vera Villalobos¹,
Viviana Andrea Corrales Mendoza¹, Fernanda Carolina Chacha Coyago¹,
Darling Balón Cortez², Leticia Villacis Morán² y Rodrigo Fernando
Espinoza Lozano⁴

¹Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas, Departamento de Ciencias Químicas y Ambientales, Laboratorio c-SinQui, Campus Gustavo Galindo, Km. 30.5 vía Perimetral, 09-01-5863, Guayaquil, Ecuador. [<https://ror.org/04qenc566>]

²Universidad de Guayaquil, Facultad de Ciencias Químicas. Ciudadela Universitaria – Av. Delta s/n, Guayaquil 090514, Ecuador. [<https://ror.org/047kyg834>]

³Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Facultad de Ciencias de la Vida, Campus Gustavo Galindo, Km. 30.5 vía Perimetral, 09-01-5863, Guayaquil, Ecuador. [<https://ror.org/04qenc566>]

⁴Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Centro de Investigaciones Biotecnológicas del Ecuador (CIBE), Campus Gustavo Galindo, Km. 30.5 vía Perimetral, 09-01-5863, Guayaquil, Ecuador. [<https://ror.org/04qenc566>]

*Autor para correspondencia: tatiana.zamoraz@ug.edu.ec

Manuscrito recibido el 04 de abril de 2022. Aceptado, tras revisión el 02 de junio de 2022. Publicado el 1 de septiembre de 2025.

Resumen

El uso de combustibles fósiles genera gases de efecto invernadero (GEI), uno de los principales causantes del calentamiento global, problemática de gran interés en las últimas décadas. El uso de biocombustibles de segunda generación se ha vislumbrado como alternativa para sustituir o disminuir el uso de combustibles fósiles. Por esta razón, el presente trabajo tiene como objetivo obtener bioetanol a partir de la cáscara de cacao (*Theobroma cacao*) del clon CCN-51 obtenido en la Provincia de Los Ríos, Ecuador, por medio de una serie de pasos que involucran: a) pretratamiento alcalino, b) hidrólisis enzimática usando dos especies de hongos endófitos de la misma cáscara de cacao (*Trichoderma reesei* y *Trichoderma ghanense*) a diferentes concentraciones y c) fermentación alcohólica usando levadura

Saccharomyces cerevisiae. La cantidad de bioetanol obtenida del proceso fue determinada por medio de un cromatógrafo de gases con detector de ionización de llama (FID). Los resultados muestran una producción moderada de bioetanol que va desde 0,024% v/v a 0,254% v/v lo que indica que la cáscara de cacao (*Theobroma cacao*) del clon CCN-51 es una matriz potencial para la producción de bioetanol.

Palabras clave: *Theobroma cacao*, *Trichoderma*, biomasa, bioetanol, fermentación alcohólica.

Abstract

The use of fossil fuels generates Greenhouse Gases (GHG), one of the main causes of global overheating, which has become a problem in recent decades. The use of second generation of biofuels has been perceived as an alternative to replace or reduce the use of fossil fuels; for this reason, the present work aims to obtain bioethanol from cocoa shell (*Theobroma cacao*) of the clone CCN-51 obtained in Los Rios Province, Ecuador, through a series of steps involving: a) alkaline pretreatment, b) enzymatic hydrolysis using two species of endophytic fungi from the same cocoa shell (*Trichoderma reesei* and *Trichoderma ghanense*) at different concentration and c) alcoholic fermentation using *Saccharomyces cerevisiae* yeast. The amount of bioethanol obtained from the process was determined by gas chromatograph with a flame ionization detector (FID). The results show a moderate production of bioethanol ranging from 0.024% v/v to 0.254% v/v, which indicates that the cocoa shell (*Theobroma cacao*) of clone CCN-51 is a potential matrix to bioethanol production.

Keywords: *Theobroma cacao*, *Trichoderma*, biomass, bioethanol, alcoholic fermentation.

Forma sugerida de citar: Vielma-Puente, J.E., Zamora Zamora, T., Galarza Romero, L.L., Monsalve, M.M., Vera Villalobos, J., Corrales Mendoza, V.A., Chacha Coyago, F.C., Balón Cortez, D., Villacis Morán, L. y Espinoza Lozano, R.F. (2025). Obtención de bioetanol a partir de la cáscara de cacao (*Theobroma cacao*) usando *Trichoderma reesei* y *Trichoderma ghanense* para la hidrólisis enzimática. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*. Vol. 42(2):154-165. <https://doi.org/10.17163/lgr.n42.2025.10>.

IDs Orcid:

Joel Eduardo Vielma Puente: <https://orcid.org/0000-0003-1158-0680>
Tatiana Zamora Zamora: <https://orcid.org/0000-0003-1115-5879>
Luis Lenin Galarza Romero: <https://orcid.org/0000-0002-2870-4080>
Meribary Monsalve Paredes: <https://orcid.org/0000-0002-4883-806X>
Joan Vera Villalobos: <https://orcid.org/0000-0002-7782-9664>
Viviana Andrea Corrales Mendoza: <https://orcid.org/0000-0002-3718-9092>
Fernanda Carolina Chacha Coyago: <https://orcid.org/0000-0001-6716-1069>
Darling Balón Cortez: <https://orcid.org/0000-0002-0323-2427>
Leticia Villacis Morán: <https://orcid.org/0000-0001-5941-8290>
Rodrigo Fernando Espinoza Lozano: <https://orcid.org/0000-0002-2051-2682>

1 Introducción

Con el transcurrir del tiempo, la actividad humana y el desarrollo industrial han convertido a los combustibles fósiles como la principal fuente de energía. En su proceso de extracción y producción una cantidad considerable de países, incluyendo Ecuador, se han beneficiado económicamente, pero también se han desencadenado problemáticas que no solo afectan a esos países productores, sino a todo el mundo en general. Un ejemplo de ello son las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), causantes en gran parte del sobrecalentamiento global.

En las últimas décadas, la ciencia se ha enfocado en la búsqueda de formas de contrarrestar ese impacto ambiental, haciendo evidente una notable acogida a los biocombustibles de segunda generación (Wahono et al., 2014; Oliva et al., 2017). Esto se debe principalmente al hecho de que para su producción se utiliza biomasa lignocelulósica, cuyas fuentes de obtención pueden ser muy variadas, como por ejemplo desechos agroindustriales de cultivos de caña y maíz (Antizar-Ladislao and Turrion-Gomez, 2008) dando lugar al aprovechamiento de material vegetal que habitualmente es descartado (Khan et al., 2025), lo que conlleva a un doble beneficio desde el punto de vista ambiental: en primer lugar, se evita el descarte de material que se acumula en la superficie terrestre y para su eliminación se emplean procesos de combustión incompleta aún más contaminantes (Cury R et al., 2017; Orejuela-Escobar et al., 2021) y en segundo lugar el consumo de estos combustibles de segunda generación reduce considerablemente la proporción de GEI que son emitidos al medio ambiente (Morais et al., 2020).

Estudios preliminares sugieren que el aprovechamiento de residuos de cultivos agrícolas (tallos, hojas y cáscaras), cultivos no alimentarios, residuos forestales y desechos agroindustriales pudieran sostener el suministro requerido de bioetanol (Anwar et al., 2014). Ecuador, por ser un país rico en diversidad vegetal, está en la capacidad de generar material lignocelulósico que pueda ser aprovechado con ese fin.

Según registros durante los años 2007 a 2012, en el país se incrementó la exportación de grano tostado y cascarilla de cacao en un 184%, posicionando a Ecuador como uno de los mayores productores y

exportadores de cacao, llegando a alcanzar el cuarto lugar a nivel mundial (Teneda Llerena et al., 2019). Si se toma como referencia la Industria Chocolatera (Caviedes Rubio et al., 2024), ésta sólo utiliza para su producción los granos del cacao, lo que corresponde a un 30% del total del fruto, el otro 70% (cáscaras y pulpa mucilaginosas) es descartado (Sarmiento Hernández, 2019). Considerando la cantidad de residuos que se generan anualmente en Ecuador a partir de esta especie vegetal, se ha estimado que la producción de bioetanol empleando dicha biomasa se podría convertir en una vía alterna de generación de energía con gran aporte al consumo nacional de combustibles (Sigüencia Avila et al., 2020), pero hasta el momento no se ha logrado.

Adicionalmente, es importante señalar que la composición del material lignocelulósico depende de su origen (Anwar et al., 2014) y la cáscara de cacao no es la excepción, pues se reporta un bajo porcentaje de celulosa que varía según el tipo de cacao del que provenga, con una abundante cantidad de lignina y hemicelulosa, componentes que interfieren en la conversión de la celulosa a biocombustible (Sarmiento Hernández, 2019). Si a esto se suma la falta de información y/o concientización sobre la temática, se obtiene como resultado las principales razones por las que dichos residuos agroindustriales no son aprovechados adecuadamente.

La composición del material lignocelulósico afecta directamente las reacciones químicas y enzimáticas que permiten la producción de bioetanol (Winarsih and Siskawardani, 2020), por esto y lo mencionado previamente es necesario brindar alternativas que involucren el aprovechamiento de la biomasa con porcentajes de conversión adecuados para que el proceso sea rentable.

En función de ello, el material lignocelulósico debe ser pretratado y luego generar la hidrólisis enzimática, método que ha resultado ser eficaz, económico y específico para lograr azúcares fermentables en condiciones de reacción suave (Winarsih and Siskawardani, 2020). El proceso depende de factores como el pH, tiempo de fermentación, sustrato (biomasa), temperatura, actividad enzimática, entre otros (Anwar et al., 2014). Existe un gran número de microorganismos capaces de degradar la celulosa y entre ellos uno de los más comunes son los hon-

gos del género *Trichoderma* (Nasir Iqbal et al., 2011; Rosyida et al., 2015) siendo la especie *Thicoderma reesei* la más comercializada por su mayor aplicación a nivel industrial en la sacarificación de celulosa a azúcares simples para la producción de biocombustibles (Adav et al., 2012; Peculyte et al., 2014).

Este estudio se desarrolla con la finalidad de iniciar la búsqueda de condiciones que permitan obtener bioetanol a partir de la biomasa del cacao, tomando en cuenta las complicaciones que puede tener trabajar con este sustrato para así poder brindar alternativas que hagan el proceso más accesible y se logre un mejor aprovechamiento de esos residuos agroindustriales.

2 Materiales y Métodos

2.1 Recolección y tratamiento de la muestra

2.1.1 Recolección de la muestra

Las cáscaras de cacao (*Theobroma cacao*) del clon CCN-51 se recolectaron en una hacienda particular en el cantón Buena Fe de la Provincia de Los Ríos-Ecuador en el mes de abril de 2020.

2.1.2 Tratamiento de la muestra

Secado y Molienda

Las cáscaras de cacao fueron cortadas en trozos de aproximadamente 1 cm³ y secadas al ambiente durante 7 días, posteriormente se trituró con un molino de platos marca Corona de tolva baja de manera manual y se separaron las partículas mediante una zaranda con un tamiz de malla #18 marca USA Standard Test Sieve de 1 mm de porosidad. Las partículas inferiores a 1 mm fueron separadas y almacenadas en un desecador.

Eliminación de extractos volátiles

Este proceso se realizó bajo el método de referencia NREL/TP-510-42619 (Sluiter et al., 2005), en el que 10,000 g de la muestra obtenida después del proceso de triturado y tamizado fueron sometidos a una extracción mediante un equipo Soxhlet en dos etapas, primero con 200 mL de agua destilada du-

rante 2 horas y posteriormente con 200 mL de etanol durante 2 horas adicionales.

2.2 Caracterización de la Biomasa

La caracterización se realizó siguiendo los procedimientos de la AOAC International, ASTM international, NREL y TAPPI, respectivamente. Todos los análisis se realizaron por triplicado.

2.2.1 Determinación del porcentaje de humedad

La determinación del porcentaje de humedad se llevó a cabo de acuerdo con la norma AOAC 934.01 (AOAC, 2012). Se pesaron 1,000 g de muestra y se colocaron en un crisol, este se llevó a una estufa precalentada a una temperatura de 105 °C y se dejó durante 3 horas. Transcurrido el tiempo se sacó el crisol y se introdujo en un desecador hasta alcanzar temperatura ambiente, posteriormente se pesó el crisol con el material resultante y se registró el valor obtenido. El crisol se colocó nuevamente en la estufa por 1 hora, y se repitió el proceso hasta obtener el peso constante.

2.2.2 Determinación del contenido de cenizas

La determinación del contenido de cenizas se llevó a cabo de acuerdo con la norma AOAC 942.05 (Thiex et al., 2012) mediante incineración a 550 °C. El crisol con la muestra obtenida luego de la determinación de humedad se introdujo en la mufla precalentada y se dejó por 5 horas, posteriormente se retiró el crisol de la mufla y se llevó a un desecador hasta alcanzar temperatura ambiente, se pesó y registró el valor obtenido; seguidamente se introdujo nuevamente el crisol con la muestra en la mufla por 1 hora adicional y se repitió el proceso hasta obtener peso constante.

2.2.3 Determinación de holocelulosa

Una muestra de 4,000 g se colocó en un matraz Erlenmeyer y se trató con 300 mL de agua destilada, 0,4 mL de ácido acético glacial y 2,000 g de clorito de sodio; luego el matraz se llevó a 75 °C en un equipo de baño María marca Memmert durante 1 hora. Este proceso se realizó 3 veces hasta obtener la muestra de coloración blanquecina. Seguidamente se aplicó baño de hielo a 10 °C, y se filtró al vacío con previa centrifugación a 3500 rpm durante 15 minutos. El producto filtrado y lavado se colocó en un

crisol y se llevó a secado en una estufa durante 4 horas a una temperatura de 105 °C; El producto seco se traspasó a un desecador hasta alcanzar temperatura ambiente, se pesó y registró el valor, repitiéndose el proceso de secado hasta obtener peso constante. El peso final de holocelulosa en la muestra se obtuvo por diferencia de pesos entre el crisol con muestra tratada y el crisol seco y vacío (Nomanbhay et al., 2013).

2.2.4 Determinación del contenido de celulosa

El contenido de celulosa de la biomasa se determinó según la norma ASTM D16-96-95(2019)e1 (ASTM International, 2019), colocándose 2,0000 g de muestra obtenida en la determinación del contenido de holocelulosa en un matraz Erlenmeyer con 10 mL de hidróxido de sodio al 17,5% (con reposo de 5 min), luego se agregó 5 mL de hidróxido de sodio al 17,5% (con reposo de 30 min), se añadió 30 mL de agua destilada (con reposo de 1 hora), se filtró al vacío y se realizaron tres lavados con una disolución de agua e hidróxido de sodio y luego con 30 mL de agua. Posteriormente se agregaron 5 mL de ácido acético al 10%; y se adicionaron 50 mL de agua destilada para lavar el residuo, con filtración al vacío finalmente. Luego se llevó la muestra a una estufa durante 12 horas a 105 °C, se sacó de la estufa y se llevó a un desecador hasta alcanzar temperatura ambiente, se pesó y registró el valor, se repitió hasta obtener peso constante. Se obtuvo el peso final de la muestra por diferencia del peso del crisol con muestra tratada y del peso de crisoles secos y vacíos.

2.2.5 Determinación del contenido de hemicelulosa

Se calculó por diferencia entre el contenido de holocelulosa y el de celulosa, siguiendo lo reportado por Loja Sánchez (2016).

2.2.6 Determinación de Lignina

El análisis se realizó según el método TAPPI T-222 om-02 (TAPPI, 2002), fundamentado en la determinación de la lignina insoluble en ácido de la madera y en todos los grados de pulpas sin blanquear. Aproximadamente 1 gramo de muestra seca tratada de cáscara de cacao se colocó en un matraz, se añadió 15 mL de ácido sulfúrico al 72% y se agitó durante 1 hora a 400 rpm en un agitador mecánico marca ColeParmer. Se transfirió la muestra a un

balón de 250 mL con 125 mL de agua destilada para reflujar durante 4 horas, se filtró al vacío, se lavó con 500 mL de agua caliente y se secó en la estufa a 105 °C por 3 horas. El producto seco se llevó a un desecador hasta alcanzar temperatura ambiente, se pesó y registró el valor, repitiéndose el proceso de secado hasta obtener peso constante.

2.3 Producción de Bioetanol

2.3.1 Pretratamiento alcalino

El análisis fue realizado según lo reportado por Jannah and Asip (2015). La muestra obtenida del proceso indicado en el apartado de *Secado y Molienda* fue tratada con hidróxido de sodio 3% hasta que se alcanzó un pH de 11. La biomasa lignocelulósica se mantuvo sumergida con la base en una relación sólido/líquido 1:10 (100 gramos de muestra/1000 mL de NaOH al 3%) en reposo a 121 °C por 90 minutos (provocando el hinchamiento de la biomasa y haciéndola más accesible para enzimas y bacterias). Luego del pretratamiento, se filtró la muestra y se neutralizó el pH con lavados continuos de agua destilada y la adición de solución de HCl al 30% hasta que el agua del filtrado presentó un pH de 5; por último, se sometió a un secado a 60 °C durante 24 horas.

2.3.2 Hidrólisis enzimática con el uso de los hongos endófitos *Trichoderma reesei* y *Trichoderma ghanense*

El método consistió en la hidrólisis mediante enzimas (celulasas) para transformar la celulosa de la cáscara de cacao en azúcares de bajo peso molecular, tomando como base el método NREL TP-510.42629 (Selig et al., 2008). Como agentes productores de estas enzimas se usaron dos hongos endófitos obtenidos de la colección de cultivos microbianos del Centro de Investigaciones Biotecnológicas del Ecuador (CIBE) de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL): *Trichoderma reesei* y *Trichoderma ghanense*.

Para su uso se llevaron previamente a cabo las siguientes etapas: Resiembra de los hongos *Trichoderma reesei* y *ghanense*: A partir de la cepa, se realizaron 3 réplicas en cajas de Petri con medio PDA, incubando a 26 °C durante 7 días hasta que se obtuvo una alta esporulación. Lavado de esporas: Se

colocaron 10 mL de suero fisiológico en un tubo y dentro del mismo se realizó la adición de 0,5 mm de los hongos *Trichoderma reesei* y *Trichoderma ghanense*, realizando la remoción mecánica de las esporas. Se ajustó la suspensión a una concentración de 1×10^7 y 1×10^9 esporas/mL, mediante el recuento en la cámara de Neubauer. Preparación del sustrato y aplicación del inóculo fúngico: Se utilizaron 50 g de sustrato de cáscara de cacao para todas las muestras, luego se procedió a esterilizar las muestras por 15 minutos a 120°C , y se aseguró el secado del producto a 60°C por 24 horas. Para brindar las condiciones necesarias al sustrato, se ajustó la humedad del medio al 75 % añadiendo 35 mL de agua destilada esterilizada a cada matraz, finalmente se colocaron 10 mL de la disolución de los hongos *Trichoderma reesei* y *Trichoderma ghanense* en las concentraciones de 1×10^7 y 1×10^9 esporas/mL, se dejó reposar las muestras a 25°C por 10 días.

2.3.3 Fermentación alcohólica

Para el proceso de fermentación se utilizó levadura de tipo *Saccharomyces cerevisiae*, eficaz para la producción de alcohol debido a su gran capacidad fermentativa (Van Zyl et al., 2007). Primero se realizó el proceso de activación de la levadura; para esto se pesaron 0,5 g de azúcar y 15 g de levadura, se agregaron en 75 mL de agua destilada previamente esterilizada y enfriada hasta alcanzar una temperatura de 28°C y se dejó reposar por 20 minutos. Una vez activada la levadura, se agregó agua destilada estéril hasta llegar a 250 mL, se procedió a incorporar en los biorreactores con cinco escenarios diferentes: escenario 1, el biorreactor contenía 50 g de muestra de cáscara de cacao obtenida del pretratamiento alcalino; escenarios 2 y 3, el biorreactor que contenía los 50 g de muestra de cáscara de cacao obtenida después del pretratamiento alcalino y posterior hidrólisis enzimática con *Trichoderma reesei* con una concentración de esporas de 1×10^7 esporas/mL para el escenario 2 y 1×10^9 esporas/mL para el escenario 3; escenarios 4 y 5, el biorreactor contenía 50 g de muestra de cáscara de cacao obtenida después del pretratamiento alcalino y posterior a la hidrólisis enzimática con *Trichoderma ghanense* con una concentración de esporas de 1×10^7 esporas/mL para el escenario 4 y 1×10^9 esporas/mL para el escenario 5. Seguidamente se selló el biorreactor para evitar la interacción con el ambiente (proceso anaeróbico); además se permitió el desfo-

gue de CO_2 mediante una manguera de purga que está acoplada al tapón, el terminal de esta manguera se sumerge en un vaso de agua destilada para recolectar dicho gas durante el proceso.

La fermentación se llevó a cabo durante un período de 4 días, a condiciones de opacidad para favorecer el proceso y temperatura ambiente (aproximadamente 25°C). Una vez finalizado el proceso, se filtró y se reservó el líquido en tubos de ensayo para que la levadura sedimente y se pueda decantar el líquido sobrenadante para su posterior análisis.

2.4 Cuantificación de Bioetanol

Para la cuantificación del etanol producido, se utilizó un cromatógrafo de gases marca Termo Scientific acoplado a un detector de ionización de llama. El análisis cuantitativo del etanol producido se expresó en mg % AA, para obtener el rendimiento en mL de etanol por cada gramo de muestra ocupada de cáscara de cacao. De forma preliminar, se elaboró una curva de calibración con etanol absoluto que sirvió para comparar la muestra obtenida y así determinar la concentración de etanol presente (Mansur et al., 2022). Las condiciones analíticas fueron optimizadas, como se recoge en la Tabla 1.

Tabla 1. Condiciones cromatográficas

Equipo	Cromatógrafo de gases (GC) marca Termo Fisher, modelo TRACE GC 1300 series
Gas de arrastre	Helio
Flujo	2 mL/min
Volumen de inyección	1 μL
Inyección en modo	Split
Temperatura del inyector	180°C
Columna	J&W Scientific DB-FFAP 60 m \times 0,250 mm (ID) \times 0,25 μm
Fase estacionaria	Ácido de polietilenglicol modificado
Temperatura del horno	180°C
Detector	Ionización de llama (FID)
Temperatura del detector	250°C

3 Resultados y Discusión

3.1 Caracterización de la biomasa

El análisis de la cáscara de cacao (*Theobroma cacao*) clon CCN-51 se realizó para determinar los parámetros de mayor importancia en la obtención de etanol, siendo estos: humedad, ceniza, holocelulosa, celulosa, hemicelulosa y lignina; luego se establecieron las condiciones óptimas del pretratamiento, hidrólisis enzimática y proceso fermentativo, cuyos valores dan selección a los procesos efectivos para una correcta fermentación etanólica.

El porcentaje de humedad obtenido fue de 11,16% como se aprecia en la Tabla 2; este valor es superior al reportado por Vivanco Carpio et al. (2018), el cual presenta un valor promedio de 8,74% para cacao nacional y 6,43% para cacao CCN-51 obtenidos de la provincia de El Oro. Esta diferencia se puede atribuir a las condiciones climáticas propias del sector montañoso de cultivo en el cantón Buena Fe, provincia de Los Ríos, las cuales mantienen un suelo húmifero apto para el crecimiento de diversos cultivos, además del contacto con la humedad del ambiente durante el transporte de la cascarilla de cacao hasta el laboratorio.

El porcentaje promedio de cenizas en la biomasa lignocelulósica evaluada fue del 10,70%, cuyo valor es similar al reportado por Villamizar Jaimes et al. (2021) en cáscara de cacao colombiano de la misma variedad con un valor estimado de 10,77% y 11,39%, según tratamiento natural o en estufa. Por su parte, Vivanco Carpio et al. (2018) evidencian un valor promedio de 5,54% en cascarilla de cacao CCN-51 de origen ecuatoriano, mientras que registra 5,14% en cacao nacional. Castillo et al. (2018) reportan 8,59% en esta variedad de cacao de origen venezolano.

Los valores de cenizas reportados en diversos estudios pueden estar influenciados por factores climáticos y edafológicos. Así lo demuestra Chafra et al. (2016) en un trabajo realizado en diferentes provincias amazónicas sobre la cáscara de cacao CCN-51, en el cual se evidencia el impacto que poseen ciertas variables como la calidad del suelo, niveles de composición mineral y la saturación de humedad. De este modo, se puede considerar que la presente matriz en estudio estaría influenciada

por los minerales propios del suelo montañoso.

Los resultados de la Tabla 2 hacen referencia a los valores promedio encontrados para celulosa (26,08%) y hemicelulosa (5,38%), ambos con un coeficiente de variación menor al 2%. Torres (2016) presenta valores similares con promedio de 24,02% de celulosa en la misma matriz, mientras que para la hemicelulosa presentaron un promedio del 2,23% pero con una precisión del 31,44% observándose una aleatoriedad de resultados. En este caso, la divergencia del contenido de hemicelulosa obedece a la metodología aplicada con ajuste de pH mediante ácido sulfúrico, compuesto inorgánico que puede degradar a este polisacárido (Torres, 2016). Así mismo, Loayza (2020) confirma la obtención de 29,09% para celulosa y 2,97% para hemicelulosa, mediante un tratamiento ácido sobre la biomasa.

Tabla 2. Contenido de humedad, cenizas, holocelulosa, celulosa, hemicelulosa y lignina de la cáscara de cacao.

Parámetro	\bar{X}	σ	C_v
Humedad	11,16%	0,05	0,54%
Cenizas	10,70%	0,34	2,71%
Holocelulosa	31,80%	0,25	0,79%
Celulosa	26,24	0,25	0,09%
Hemicelulosa	5,38	0,09	1,66%
Lignina	28,52%	0,75	2,62%

La lignina total de una biomasa está conformada por la lignina insoluble en ácido y en menor proporción por la lignina soluble en ácido; siendo la primera la de mejor identificación por su principal abundancia en la biomasa lignocelulósica y aplicación de métodos gravimétricos. Si bien es cierto, la referencia bibliográfica refleja que la lignina es el compuesto mayoritario presente en la biomasa de cacao, tal como se corrobora en los análisis obtenidos por Encalada and Jácome (2018) con un valor promedio de 25,81%, y por Vásquez (2010) con un rango de concentración de 14,6% a 26,38%. Esta información se complementa con estudios que reportan otros investigadores con valores de lignina total superiores al 40%, como es el caso de Benalcázar (2018), obteniendo 46,61%, o por Torres (2016), que de acuerdo con una serie de análisis realizados reportó valores de 33,43 a 45,39%.

El presente estudio se enfoca en la determinación de la lignina ácida no soluble, teniendo en cuenta que es el polímero de mayor proporción dentro de la biomasa de interés y considerando que la

lignina soluble se pierde durante el proceso de extracción de compuestos volátiles. El valor promedio obtenido fue 28,52%, tal como se ve reflejado en la Tabla 2, con un coeficiente de variación correspondiente al 2,62%, el cual certifica la precisión de los resultados obtenidos.

3.2 Producción y cuantificación de bioetanol

Durante el pretratamiento de la biomasa con hidróxido de sodio al 3% se evidenciaron cambios físicos debido a la remoción de la lignina. Uno de los cambios observados fue el hinchamiento de la biomasa y un cambio de color del marrón típico de la cáscara de cacao seca a un color negro luego del pretratamiento alcalino, debido al rompimiento de los enlaces esterés del material vegetal para la eliminación de la lignina y su color rojizo. Posteriormente con ajuste del pH también se observaron cambios en el color de la biomasa, pasando de negro a café claro.

La hidrólisis enzimática fue realizada con dos hongos diferentes *Trichoderma reesei* y *Trichoderma ghanense*, y las concentraciones de las esporas utilizadas fue de 1×10^7 y 1×10^9 esporas/mL para ambos hongos y después de 10 días a temperatura ambiente en contacto con la biomasa dentro del reactor se logró observar el desarrollo de una coloración verdosa sobre la superficie de la biomasa y de manera más abundante en las paredes del reactor, lo que indica el crecimiento del hongo antagonista. Además, se observó el hinchamiento de la biomasa propio de la conversión de celulosa y hemicelulosa en azúcares fermentables.

Posterior al proceso de hidrólisis enzimática se procedió a la fermentación alcohólica usando levadura de tipo *Saccharomyces cerevisiae* durante 4 días. Durante este periodo se observó un fuerte burbujeo en el desfogue del biorreactor, lo que indica la emisión de CO_2 , subproducto de la fermentación alcohólica; además, se observó un hinchamiento de la biomasa tratada y el crecimiento abundante de levadura en la superficie del biorreactor. Al destapar el biorreactor también se apreció un olor fuerte característico de los procesos de fermentación.

Previo al análisis de los productos fermentados, se realizó la curva de calibración con cinco puntos de concentración preparados a partir del estándar

de etanol, estos fueron 0,1; 0,3; 0,5; 0,7 y 0,9% (v/v) obteniéndose un coeficiente de correlación satisfactorio (R: 0,9931). Para la interpretación de los cromatogramas resultantes se utilizó la información obtenida a partir del pico de elución de etanol, con base en sus áreas y tiempos de retención.

Sobre el análisis de las muestras, los resultados logrados demuestran que el Escenario 1, sin la aplicación de una hidrólisis enzimática, generó el mayor contenido de etanol en el orden de 0,25% v/v a diferencia del Escenario 2 que obtuvo porcentajes menores al 0,1% v/v, y del Escenario 3 que generó valores inferiores al 0,15% v/v, y del Escenario 4 que mostró porcentajes menores al 0,22% y del Escenario 5 que presentó porcentajes menores al 0,15% como se muestra en la Tabla 3.

De acuerdo con los valores obtenidos en el Escenario 1, estos son comparables con el estudio realizado por Benalcázar (2018), donde se obtuvo una concentración de etanol de 0,57% v/v empleando un tratamiento de hidrólisis alcalina en condiciones similares al presente estudio, lo cual permite demostrar que el método es útil en la cáscara de cacao debido a su capacidad de romper los enlaces que unen a las cadenas de lignina y la hemicelulosa. Sin embargo, el rendimiento no es lo suficientemente alto en el tratamiento biológico.

La composición de la biomasa lignocelulósica es diferente para cada tipo de sustrato, de esta forma, la cantidad presente de celulosa y hemicelulosa permite determinar la conversión de azúcares a etanol, tal como lo demuestra Casabar et al. (2019), en su estudio sobre la producción de bioetanol a partir de la cáscara de piña, donde se destaca que a medida que disminuye el azúcar reductor, aumenta la producción de bioetanol. Esto se debe principalmente a los azúcares fermentables obtenidos luego del desdoblamiento de celulosa y hemicelulosa, ya que estos monosacáridos son utilizados en el proceso fermentativo por la levadura *Saccharomyces cerevisiae* para su conversión en etanol.

La matriz de cáscara de cacao empleada en este trabajo reporta un 26,24% de celulosa y solo un 5,38% de hemicelulosa, pudiendo limitar este último la transformación a azúcares reductores. En este caso, la disposición de hemicelulosa para el proceso fermentativo puede verse afectada por el pretra-

tamiento de hidrólisis aplicado, ya que este separa las uniones estructurales entre la lignina y los carbohidratos, generando la degradación de la hemicelulosa y la solubilización de la lignina, disminu-

yendo gradualmente el contenido del polímero para su conversión a azúcares, tal como lo corrobora Sánchez Riaño et al. (2010) en los diferentes tipos de pretratamientos químicos aplicados a la biomasa.

Tabla 3. Resultados de la producción de bioetanol

Escenario	Muestra	Tiempo de retención	% v/v de etanol
Escenario 1: pretratamiento alcalino	Blanco 1	4,187	0,267
	Blanco 2	4,183	0,133
	Blanco 3	4,190	0,362
			$\bar{X} = 0,254$
Escenario 2: pretratamiento alcalino + <i>T. reesei</i> 1×10^7 esporas/mL	E2M1	4,185	0,083
	E2M2	4,183	0,145
	E2M3	4,183	0,026
			$\bar{X} = 0,084$
Escenario 3: pretratamiento alcalino + <i>T. reesei</i> 1×10^9 esporas/mL	E3M1	4,185	0,029
	E3M2	4,183	0,045
	E3M3	4,183	0,000
			$\bar{X} = 0,024$
Escenario 4: pretratamiento alcalino + <i>T.</i> <i>ghanense</i> 1×10^7 esporas/mL	E4M1	4,183	0,1256
	E4M2	4,185	0,2251
	E4M3	4,183	0,0559
			$\bar{X} = 0,1355$
Escenario 5: pretratamiento alcalino + <i>T.</i> <i>ghanense</i> 1×10^9 esporas/mL	E5M1	4,185	0,1444
	E5M2	4,185	0,1057
	E5M3	4,187	0,0686
			$\bar{X} = 0,1062$

En función de los antecedentes, se destaca al Escenario 1 como el de mejor rendimiento para la producción de bioetanol de acuerdo con las variables ensayadas, el cual estuvo limitado por dos factores, el tipo de pretratamiento utilizado, tal como se ha descrito previamente, y el contenido de lignina presente en el sustrato, ya que este polímero limita el desdoblamiento de la celulosa y la hemicelulosa durante los procesos de hidrólisis aplicados (Ko et al., 2015). De acuerdo a la literatura revisada, la aplicación de una hidrólisis enzimática con el hongo *Trichoderma spp.* podría generar una mayor cantidad de azúcares reductores a partir de sus enzimas celulasas. En ese sentido, López et al. (2014), demostraron que la cáscara de banano generó hasta

un 5,18% v/v de etanol con la intervención de la especie mencionada, considerándose que posee un 23% tanto para celulosa como para hemicelulosa, respectivamente.

Sin embargo, los escenarios del presente estudio tratados con *Trichoderma reesei* generaron un bajo rendimiento etanólico de 0,084% v/v y 0,024% v/v y con *Trichoderma ghanense* 0,1355% v/v y 0,1062% v/v, evidenciando que la composición de la biomasa marca una diferencia sobre la acción del hongo, atribuyéndose el efecto en función del contenido limitado de hemicelulosa. Así mismo los resultados de los Escenarios del 2 al 5 permiten inferir que el bajo rendimiento se debe también a la incidencia

de otros dos factores, el tiempo de duración de la hidrólisis y la concentración del microorganismo empleado. Estas dos variables interactúan de manera simultánea, ya que en un tiempo determinado el hongo ya no tendrá más celulosa por degradar y empezará a consumir la glucosa generada para su supervivencia.

De igual forma, los factores que tuvieron incidencia en la producción de etanol fueron la composición de la biomasa, el tipo de pretratamiento y la concentración del microorganismo empleado. En este contexto, se demuestra una hipótesis negativa en relación con la incidencia del hongo sobre el residuo lignocelulósico de cacao, debido al bajo rendimiento que posee la aplicación de un hongo fitopatógeno en el proceso de obtención de etanol.

Por otra parte, al comparar los porcentajes de alcohol producido en los escenarios que involucran los hongos *Trichoderma reesei* y *Trichoderma ghanense*, este último presentó mayor porcentaje de rendimiento.

4 Conclusiones

Este estudio ha permitido disponer de una matriz caracterizada por su composición lignocelulósica con un alto contenido de lignina y un bajo contenido de hemicelulosa, evidenciando correspondencia con los datos reportados por otros autores en una misma variedad de cáscara de cacao. A efectos de su aprovechamiento como biomasa, la cáscara de cacao resulta un sustrato de interés en los procesos de conversión para la obtención de etanol.

Las diferentes variables ensayadas durante el proceso fermentativo de este estudio comparativo han permitido establecer que las condiciones óptimas para la mayor obtención de bioetanol se dieron a partir de un pretratamiento alcalino, a temperatura ambiente sobre la base de 50 g de biomasa, durante un periodo de 3 días, reconociendo al Escenario 1 como el de mejor rendimiento etanólico con un porcentaje del 0,25 %v/v. La cáscara de cacao requeriría de un mayor contenido de hemicelulosa, que en conjunto con la celulosa genere una adecuada concentración de azúcares reductores, permitiendo que la aplicación de una hidrólisis enzimática con los hongos *Trichoderma reesei* y *Trichoderma ghanense*

aumente significativamente el rendimiento etanólico.

Contribución de los autores

V.P.J.E.: Conceptualización, metodología, recursos, supervisión, revisión y edición de escritura. T.Z.Z.: Conceptualización, metodología, administración de proyecto, visualización y escritura de borrador original. L.L.G.R.: Metodología y recursos. M.M.M.: Metodología, supervisión validación, revisión y edición de escritura. J.V.V.: Investigación y recursos. V.A.C.M.: Investigación, análisis formal y validación. F.C.C.C.: Investigación, análisis formal y validación. D.B.C.: Investigación, análisis formal y validación. L.V.M.: Investigación, análisis formal y validación. R.F.E.L.: Investigación y recursos.

Referencias

- Adav, S. S., Tze Chao, L., and Kwan Sze, S. (2012). Quantitative secretomic analysis of *Trichoderma reesei* strains reveals enzymatic composition for lignocellulosic biomass degradation. *Molecular & Cellular Proteomics*, 11(7):1–15. Online: <https://n9.cl/rd8o96>.
- Antizar-Ladislao, B. and Turrion-Gomez, J. L. (2008). Second-generation biofuels and local bioenergy systems. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 2(5):455–469. Online: <https://n9.cl/1zd89>.
- Anwar, Z., Gulfranz, M., and Irshad, M. (2014). Agro-industrial lignocellulosic biomass a key to unlock the future bio-energy: A brief review. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 7(2):163–173. Online: <https://n9.cl/mlpp59>.
- AOAC (2012). *AOAC International, Official Method 934.01*. Online: <https://n9.cl/kcu58>.
- ASTM International (2019). *Astm d1696-95(2019)e1: Standard Test Method for solubility of cellulose in sodium hydroxide*. Technical report, American Society for Testing and Materials. Online: <https://n9.cl/g375h>.
- Benalcázar, J. (2018). Evaluación de diferentes pretratamientos químicos a la biomasa de la cáscara de cacao para procesos de fermentación alcohólica. Tesis de grado, Universidad San Francisco de Quito. Online: <https://n9.cl/rrebswk>.
- Casabar, J., Unpaprom, Y., and Ramaraj, R. (2019). Fermentation of pineapple fruit peel wastes for bioethanol production. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 9:761–765. Online: <https://n9.cl/2ir9w>.

- Castillo, E., Alvarez, C., and Contreras, Y. (2018). Caracterización fisicoquímica de la cáscara del fruto de un clon de cacao (*Theobroma cacao* L.) cosechados en Cauca, estado Miranda, Venezuela. *Revista de Investigación*, 48(95):154–167. Online: <https://n9.cl/uap1c>.
- Caviedes Rubio, D. I., Parra García, F. E., and Andrade Vargas, C. K. (2024). Ecological, economic and social impacts of the Colombian cocoa sector. *La Granja*, 40(2):50–64. Online: <https://n9.cl/tvh35>.
- Chafla, A., Rodriguez, Z., Boucourt, R., and Torres, V. (2016). Bromatological characterization of cocoa shell (*Theobroma cacao*), from seven cantons of the Amazonia, Ecuador. *Cuban Journal of Agricultural Science*, 50(2):245–252. Online: <https://n9.cl/goi4m>.
- Cury R, K., Aguas M, Y., Martinez M, A., Olivero V, R., and Chams Ch, L. (2017). Residuos agroindustriales su impacto, manejo y aprovechamiento. *Revista Colombiana de Ciencia Animal*, 9(Suppl. 1):122–132. Online: <https://n9.cl/ydvj>.
- Encalada, J. and Jácome, P. (2018). Determinación de parámetros cinéticos en la devolatilización de biomasa residual de cacao ecuatoriano. Tesis de grado, Universidad Central del Ecuador. Online: <https://n9.cl/3lhtyn>.
- Jannah, A. M. and Asip, F. (2015). Bioethanol production from coconut fiber using alkaline pretreatment and acid hydrolysis method. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 5(5):320–322. Online: <https://n9.cl/hilrln>.
- Khan, S., Ali, M., Mustafa, A., and Iqbal, A. (2025). Urban photobioreactor for CO₂ sequestration and microalgal biomass production. *La Granja*, 41(1):100–117. Online: <https://n9.cl/t47z8>.
- Ko, J. K., Um, Y., Park, Y. C., Seo, J. H., and Kim, K. H. (2015). Compounds inhibiting the bioconversion of hydrothermally pretreated lignocellulose. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 99:4201–4212. Online: <https://n9.cl/s5rsd>.
- Loayza, K. (2020). Determinación de las condiciones óptimas de fermentación para la obtención de bioetanol a partir del hidrolizado ácido de la corteza de cacao (*Theobroma cacao*) proveniente de la industria cacaotera del Ecuador. Tesis de grado, Universidad Politécnica Salesiana. Online: <https://n9.cl/rk6wl>.
- Loja Sánchez, C. P. (2016). Optimización de los residuos de cascarilla de arroz mediante pretratamiento por hidrólisis ácida para la obtención de azúcares reductores. Tesis de grado, Universidad de Cuenca. Online: <https://n9.cl/0njsl>.
- López, J., Cuarán, J., Arenas, L., and Flórez, L. (2014). Usos potenciales de la cáscara de banano: elaboración de un bioplástico. *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales*, 1(1):7–21. Online: <https://n9.cl/nvya3>.
- Mansur, A. R., Oh, J., Lee, H. S., and Oh, S. Y. (2022). Determination of ethanol in foods and beverages by magnetic stirring-assisted aqueous extraction coupled with GC-FID: A validated method for halal verification. *Food Chemistry*, 366:130526. Online: <https://n9.cl/lisy6u>.
- Morais, W., Pacheco, T., Correa, P., Martins, A., Mata, T., and Caetano, N. (2020). Acid pretreatment of sugarcane biomass to obtain hemicellulosic hydrolysate rich in fermentable sugar. *Energy Reports*, 6(Suppl. 8):18–23. Online: <https://n9.cl/v5ves>.
- Nasir Iqbal, H., Ahmed, I., Zia, M., and Irfan, M. (2011). Purification and characterization of the kinetic parameters of cellulase produced from wheat straw by *Trichoderma viride* under ssf and its detergent compatibility. *Advances in Bioscience and Biotechnology*, 2(3):149–156. Online: <https://n9.cl/d31ao>.
- Nomanbhay, S., Hussain, R., and Palanisamy, K. (2013). Microwave-assisted alkaline pretreatment and microwave assisted enzymatic saccharification of oil palm empty fruit bunch fiber for enhanced fermentable sugar yield. *Journal of Sustainable Bioenergy Systems*, 3(1):7–17. Online: <https://n9.cl/699ly>.
- Oliva, J. M., Negro, M. J., Manzanares, P., Ballesteros, I., Chamorro, M., Sáez, F., Ballesteros, M., and Moreno, A. D. (2017). A sequential steam explosion and reactive extrusion pretreatment for lignocellulosic biomass conversion within a fermentation-based biorefinery perspective. *Fermentation*, 3(2):1–15. Online: <https://n9.cl/ddzoa>.
- Orejuela-Escobar, L. M., Landázuri, A. C., and Goodell, B. (2021). Second generation biorefining in Ecuador: Circular bioeconomy, zero waste technology, environment and sustainable development: The nexus. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, 6(2):83–107. Online: <https://n9.cl/5qisge>.
- Peculyte, A., Anasontzis, G., Karlström, K., Larsson, P. T., and Olsson, L. (2014). Morphology and enzyme production of *Trichoderma reesei* Rut C-30 are affected by the physical and structural characteristics of cellulosic substrates. *Fungal Genetics and Biology*, 72:64–72. Online: <https://n9.cl/1e0l6>.
- Rosyida, V., Indrianingsih, A., Maryana, R., and Wahono, S. (2015). Effect of temperature and fermentation time of crude cellulase production by *Trichoderma Reesei*

- on straw substrate. *Energy Procedia*, 65:368–371. Online: <https://n9.cl/33llu>.
- Sarmiento Hernández, J. S. (2019). Evaluación del uso de la cáscara de cacao como sustituto parcial de la matriz polimérica en la obtención de espumas de poliuretano. Tesis de grado, Fundación Universidad de América. Online: <https://n9.cl/g86wuw>.
- Selig, M., Weiss, N., and Ji, Y. (2008). Enzymatic saccharification of lignocellulosic biomass, NREL/TP-510-42629. Technical report, National Renewable Energy Laboratory (NREL). Online: <https://n9.cl/mfyv6>.
- Sigüencia Avila, J. M., Delgado Noboa, J. W., Posso, F., and Sanchez Quezada, J. P. (2020). Estimación del potencial de producción de bioetanol a partir de los residuos de la corteza del cacao en Ecuador. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 21(3):1–20. Online: <https://n9.cl/8urepk>.
- Sluiter, A., Ruiz, R., Scarlata, C., Sluiter, J., and Templeton, D. (2005). Determination of extractives in biomass, NREL TP-510-42619. Technical report, National Renewable Energy Laboratory (NREL). Online: <https://n9.cl/sh4rv>.
- Sánchez Riaño, A. M., Gutiérrez Morales, A. I., Muñoz Hernández, J. A., and Rivera Barrero, C. A. (2010). Producción de bioetanol a partir de subproductos agroindustriales lignocelulósicos. *Revista Tumbaga*, 1(5):61–91. Online: <https://n9.cl/g736is>.
- TAPPI (2002). Acid-insoluble lignin in wood and pulp. T 222 om-02. Technical report, Technical Association of the Pulp and Paper Industry.
- Teneda Llerena, W. F., Guamán Guevara, M. D., and Oyaque Mora, S. M. (2019). Exploración de la intención de consumo de la cascarilla de cacao (*Theobroma cacao* l.) como infusión: caso Tungurahua-Ecuador. *Cuadernos de Contabilidad*, 20(50):1–14. Online: <https://n9.cl/5gsqg>.
- Thiex, N., Novotny, L., and Crawford, A. (2012). Determination of ash in animal feed: AOAC Official Method 942.05 Revisited. *Journal of AOAC international*, 95(5):1392–1397. Online: <https://n9.cl/6v757>.
- Torres, Y. (2016). Caracterización de biomasa lignocelulósica (*Theobroma cacao* l.) para uso en la obtención de etanol por vía fermentativa. Tesis de grado, Universidad Santo Tomás.
- Van Zyl, W., Lynd, L., Den Haan, R., and McBride, J. (2007). *Consolidated Bioprocessing for Bioethanol Production Using Saccharomyces cerevisiae*, volume 108. Springer. 205–235. Online: <https://n9.cl/u3jibg>.
- Villamizar Jaimes, Y. L., Rodríguez Guerrero, J. S., and León Castrillo, L. C. (2021). Caracterización fisicoquímica, microbiológica y funcional de harina de cáscara de cacao (*Theobroma cacao* l.) variedad ccn-51. *Cuaderno Activa*, 9(9):65–75. Online: <https://n9.cl/uznkwo>.
- Vivanco Carpio, E., Matute Castro, L., and Campo Fernández, M. (2018). Caracterización físico-química de la cascarilla de *Theobroma cacao* L., variedades nacional y CCN-51. In *Conference Proceedings UTMACH*, volume 2, pages 213–222. Online: <https://n9.cl/fizwm9e>.
- Vásquez, J. (2010). Caracterización microbiológica y producción de *Trichoderma harzianum* y *Trichoderma viride* en cultivo artesanal. Tesis de grado, Pontificia Universidad Javeriana. Online: <https://n9.cl/z9w6j>.
- Wahono, S., Darsih, C., Rosyida, V., Maryana, R., and Pratiwi, D. (2014). Optimization of cellulose enzyme in the simultaneous saccharification and fermentation of sugarcane bagasse on the second-generation bioethanol production technology. *Energy Procedia*, 47:268–272. Online: <https://n9.cl/h7x0m>.
- Winarsih, S. and Siskawardani, D. D. (2020). Hydrolysis of corncobs using a mixture of crude enzymes from *Trichoderma reesei* and *Aspergillus niger* for bioethanol production. *Energy Reports*, 6(Suppl. 8):256–262. Online: <https://n9.cl/09eb4>.

NORMAS PARA AUTORES

El presente manual describe los pasos que deberá tener en cuenta para realizar un envío satisfactorio de su manuscrito. Tómese el tiempo necesario para leer cuidadosamente el presente documento.

1 Información general

«La Revista de Ciencias de la Vida, La Granja» es una publicación científica bilingüe de la Universidad Politécnica Salesiana de Ecuador, editada desde enero de 2002 de forma ininterrumpida, con periodicidad fija semestral, especializada en Ciencias de la Vida, Ambientales y sus líneas transdisciplinarias como Ciencias de la Tierra, Biotecnología y Ciencias Agropecuarias, y Desarrollo Local Sostenible, entre otras.

Es una revista científica arbitrada, que utiliza el sistema de evaluación externa por expertos (*peer-review*), bajo metodología de pares ciegos (*double-blind review*), conforme a las normas de citación del estilo Harvard. El cumplimiento de este sistema permite garantizar a los autores un proceso de revisión objetivo, imparcial y transparente, lo que facilita a la publicación su inclusión en bases de datos, repositorios e indexaciones internacionales de referencia.

«La Revista de Ciencias de la Vida, La Granja» se encuentra indexada en SCOPUS, en el Emerging Source Citation Index ESCI de la Web of Science, en el directorio y catálogo selectivo del Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal (Latindex), en el Sistema de Información Científica REDALYC, en el Directorio de Revistas de Acceso Abierto DOAJ en el sistema de Clasificación Integrada de Revistas Científicas CIRC, en BaseSearch, la Máquina de Búsqueda Académica de *Bielefeld*, y en más de 42 repositorios, bibliotecas y catálogos especializados de Iberoamérica.

La revista se edita en doble versión: impresa (ISSN: 1390-3799) y electrónica (e-ISSN: 1390-8596), en español e inglés, siendo identificado además cada trabajo con un DOI (Digital Object Identifier System).

Todos los artículos son publicados para poder

acceder a su contenido de manera abierta sin restricciones económicas, tanto en las fases de envío, revisión, publicación y traducción integrada de los manuscritos.

2 Alcance y política

2.1 Temática

Contribuciones originales en materia de Ciencias de la Vida, Ambientales y sus líneas transdisciplinarias como Ciencias de la Tierra, Biotecnología y Ciencias Agropecuarias, y Desarrollo Local Sostenible y todas aquellas disciplinas conexas interdisciplinariamente con la línea temática central.

2.2 Aportaciones

«La Revista de Ciencias de la Vida, La Granja» edita preferentemente resultados de investigación empírica, teórica o experimental (*Scientific Articles*), redactados en español y/o inglés, siendo también admisibles selectas revisiones bibliográficas (*Reviews*).

Todos los trabajos deben ser originales, no haber sido publicados en ningún medio ni estar en proceso de arbitraje o publicación.

De esta manera, las aportaciones en la revista pueden ser:

a. Investigaciones Científicas (*Scientific Articles*):

5.000 a 6.500 palabras de texto, incluyendo título, resúmenes, introducción, materiales y métodos, resultados, conclusiones, tablas, figuras y referencias. Las referencias deberán estar citadas, ser actuales y selectivas de alrededor de unas 40 obras.

b. Revisiones (*Reviews*):

Máximo sugerido 7.000 palabras de texto, incluidas tablas y referencias. Se valorará especialmente las referencias justificadas, actuales y selectivas de alrededor de unas 50 obras.

«La Revista de Ciencias de la Vida, La Granja» tiene periodicidad semestral (20 artículos por año), publicada en los meses de marzo y septiembre.

2.3 Política económica abierta

«La Revista de Ciencias de la Vida, La Granja», es una revista abierta, donde todos los artículos son publicados para poder acceder a su contenido de manera abierta sin restricciones de contenido o económicas, tanto en el proceso de revisión como de publicación y traducción íntegra de los manuscritos. La revista es publicada por el Editorial Abya-Yala, en Quito, Ecuador.

2.4 Copyright

Las obras que se publican en «La Revista de Ciencias de la Vida, La Granja» están sujetas a los siguientes términos:

1. La Universidad Politécnica Salesiana (RUC: 0190151530001) conserva los derechos patrimoniales (copyright) de las obras publicadas, y favorece y permite la reutilización de las mismas bajo la licencia *Creative Commons Reconocimiento-No-Comercial-Sin Obra Derivada 3.0 Ecuador*, por lo cual se pueden copiar, usar, difundir, transmitir y exponer públicamente, siempre que:
 - Se cite la autoría y fuente original de su publicación (revista, editorial, URL y DOI de la obra).
 - No se usen para fines comerciales u onerosos.
 - Se mencione la existencia y especificaciones de esta licencia de uso.
2. La publicación otorgará a cada artículo un *Digital Object Identifier* (DOI). Ejemplo: Navarrete, Bernardo, Oswaldo Valarezo, Ernesto Cañarte y Ramón Solórzano. 2017. Efecto del nim (*Azadirachta indica Juss.*) sobre *Bemisia tabaci* Gennadius (*Hemiptera: Aleyrodidae*) y controladores biológicos en el cultivo del melón *Cucumis melo* L. La Granja: Revista de Ciencias de la Vida. Vol. 25(1):33-4. <https://doi.org/10.17163/ret.n12.2016.05>

2.5 Uso de inteligencia artificial (IA)

La Revista de Ciencias de la Vida, La Granja, permite el uso de herramientas de inteligencia artificial únicamente como apoyo en la redacción, edición lingüística, análisis estadístico o procesamiento de datos, siempre que dichas herramientas no sustituyan el juicio académico ni la autoría intelectual de los investigadores.

El uso de IA debe ser declarado de manera explícita y/o en el apartado de Metodología, si forma parte de la metodología científica de los resultados presentados. Se debe indicar la herramienta utilizada y el propósito de su aplicación. En todo momento, la aplicación de IA debe estar bajo supervisión humana, y la responsabilidad plena sobre el contenido, exactitud y originalidad del manuscrito recae exclusivamente en los autores. No se permite asignar autoría a sistemas de IA ni utilizarlos para generar resultados falsos, manipulados o sin verificación científica.

3 Presentación, estructura y envío de los manuscritos

Todos los autores han registrarse con sus créditos, filiaciones institucionales, país e identificador ORCID en la plataforma OJS; si bien sólo uno de ellos será el responsable de correspondencia. Ningún autor podrá enviar o tener en revisión dos manuscritos de forma simultánea, estimándose una carencia de un número consecutivo (1 año).

Cuando presente el artículo, usted no debe intentar diseñar el manuscrito, no justifique el documento, o centre los títulos, ni utilice el formato de doble columna. El único formato requerido es que los nombres en latín de los organismos deben estar en *itálicas*.

Los trabajos se presentarán en tipo de letra Arial número 10, interlineado doble (excepto para los títulos de tablas y figuras), justificado completo y sin tabuladores ni espacios en blanco entre párrafos. Todas las líneas deberán estar enumeradas de forma automática (Word>Diseño de página>Números de línea>continuo). Solo se separarán con un espacio en blanco los grandes bloques (título, autores, resumen, introducción, materiales y métodos, resultados, conclusiones y referencias).

La página debe tener 2 centímetros en todos sus márgenes (descargar “manuscrito anonimizado”). Los trabajos deben presentarse en documento de Microsoft Word (.doc o .docx) o LaTeX (.tex) que incluya las referencias en formato (.bib), siendo necesario que el archivo esté anonimizado en Propiedades de Archivo, de forma que no aparezca la identificación de autor/es.

Los manuscritos deben ser enviados única y exclusivamente a través del OJS (Open Journal System), en el cual todos los autores deben darse de alta previamente. No se aceptan originales enviados a través de correo electrónico u otra interfaz.

Por motivos de mejoramiento de la visibilidad e impacto de las publicaciones, todos los autores deben tener un número ORCID <<https://orcid.org/>>y se sugiere que al menos uno de los autores tenga una cuenta en Research Gate <<https://www.researchgate.net/home>>.

3.1 Estructura del manuscrito

Para aquellos trabajos que se traten de investigaciones científicas, los manuscritos seguirán la estructura IMRDC (Introducción, Materiales y Métodos, Resultados, Discusión y Conclusiones), cualquier uso de anexos se enviará como un documento aparte en Word o Latex y será catalogada como información complementaria (descargar “manuscrito anonimizado”).

Los trabajos que se traten de Revisiones Bibliográficas, podrán ser más flexibles en sus epígrafes, especialmente en Materiales y Métodos, Resultados y Discusión. En todas las tipologías de trabajos son obligatorias las Referencias que en lo posible deberán incluir un link electrónico de referencia. En cualquier caso los documentos constarán de las siguientes secciones:

a. Título (español) / Title (inglés):

Conciso pero informativo, en castellano en primera línea y en inglés en segunda. Se aceptan como máximo 25 palabras con espacios incluidos. El título no solo es responsabilidad de los autores, pudiéndose proponer cambios por parte del Consejo Editorial.

Es necesario escribirlo en mayúsculas y minúsculas, centrado; si contiene nombres científicos de taxa, destacarlos con cursivas, sin el autor del taxón.

b. Nombres y filiación de los autores:

Nombre(s) y Apellido(s) de cada uno de los autores, organizados por orden de prelación. Junto a los nombres ha de seguir centro de trabajo, dirección, ciudad, país, correo electrónico de cada autor y número de ORCID. Adicionalmente se debe incluir qué autor será el responsable del manuscrito o autor por correspondencia, señalándolo con un asterisco (*). Dicha información será únicamente presentada en el archivo modelo denominado “presentación-portada” (descargar “presentación-portada”).

c. Resumen (español) / Abstract (inglés):

Tendrá como extensión máxima 250 palabras, primero en español y después en inglés. En el resumen se describirá de forma concisa implícita o explícitamente y en este orden: Justificación del tema; Objetivos; Metodología y muestra; Principales resultados; Principales conclusiones. Ha de estar escrito de manera impersonal “El presente trabajo analiza...”. En el caso del abstract no emplee traductores automáticos, tome el debido cuidado al traducir su resumen, es la primera impresión que tendrá el revisor.

d. Palabras clave (español) / Keywords (inglés):

Se deben exponer de 4 a 6 descriptores por cada versión idiomática relacionados directamente con el tema del trabajo. Trate de no repetir las mismas palabras del título. Deben colocarse tanto en español, como en inglés.

e. Introducción:

Se sugiere utilizar el sistema SPPR Situación (Estado del Arte), Problema, Pregunta (Hipótesis del Estudio) y Respuesta (Objetivo del Estudio). De esta manera, se debe exponer de manera clara y con suficientes referencias bibliográficas el estado del arte actualizado de su estudio, el planteamiento del problema, el contexto de la problemática, la justificación, fundamentos y propósito del estudio, utilizando la literatura más significativa y actual del tema.

f. Materiales y métodos:

Deben ser redactados de forma que el lector pueda comprender con facilidad el desarrollo de la investigación. Describirá cronológicamente la metodología, la muestra y la forma de muestreo, así como se hará referencia al tipo de análisis estadístico empleado. Asegurando en todo momento la replicabilidad de su experimento explicando el diseño experimental, equipos de laboratorio utilizados y programas computacionales, entre otros. En toda metodología utilizada, es necesario exponer las razones que han conducido a su empleo y describir sus posibles limitaciones.

g. Resultados y Discusión:

Se procurará resaltar las observaciones más importantes. Debe incluir la información cuantitativa o cualitativa que sustentará las conclusiones finales. Aparecerán en una secuencia lógica en el texto y las Tablas, Figuras y ecuaciones imprescindibles evitando la duplicidad de datos. Toda tabla, figura o ecuación deberá estar citada en el texto y enumerada secuencialmente.

Para el caso de las ecuaciones, emplee el editor de ecuaciones de Word o mediante programación en Latex, coloque de manera consecutiva las ecuaciones ordenándolas mediante un número encerrado entre paréntesis (1), para mejor comprensión vea el documento "manuscrito anonimizado".

Las fotos, ilustraciones y gráficas únicamente se presentan como figuras, y éstas, al igual que las tablas, deben incluir una descripción explicativa para cada una, ver manuscrito anonimizado.

En el texto, toda tabla y figura deben ser nombradas, analizadas y discutidas resaltando los hallazgos más representativos y/o limitaciones del estudio. Cite dentro del texto Figura 6 o Tabla 1, por ejemplo. No abrevie la palabra figura o tabla.

Las figuras pueden ser dibujos lineales, mapas, o fotografías de medios tonos en blanco y negro o a color en resolución de 300 dpi, es decir el tamaño de la figura debe ser grande, apropiado para la publicación en formato de calidad. Cada figura debe ser adjuntada con el envío en formato TIFF, PNG o JPG enumeradas en el orden de aparición. Los autores deberán tomar en cuenta que las leyendas y ejes de

las figuras deben ser perfectamente legibles tanto al ampliar como reducir la figura.

Diseñe las figuras para que se ajusten eventualmente al tamaño final de la revista 19,2 × 26,2 cm. Asegúrese de que las inscripciones o detalles, así como las líneas, tengan tamaños y grosores adecuados de tal manera que no queden ilegibles cuando sean reducidos a su tamaño final (números, letras y símbolos deben ser reducidos al menos a 2,5 mm de altura después que las ilustraciones han sido reducidas para ajustarse a la página impresa). Idealmente, las ilustraciones lineales deben ser preparadas a aproximadamente a un cuarto de su tamaño final de publicación, ejemplo: 4,7 × 6,5 cm.

Diferentes elementos en la misma figura deben ser deletreados a, b, c, d, etcétera. Las fotografías deben gravarse con alto contraste y en alta resolución. Recuerde que las fotografías frecuentemente pierden contraste en el proceso de impresión.

Si las figuras han sido previamente usadas, es de responsabilidad única del autor el obtener el/los permisos correspondientes. Evite problemas posteriores relacionados con los derechos de autor.

h. Conclusiones y Discusión:

El apartado de Discusiones puede aparecer en los Resultados o en las Conclusiones, a preferencia del autor. Las Conclusiones resumirán los hallazgos más importantes, relacionando las propias observaciones con estudios de interés, señalando aportaciones y limitaciones, sin redundar datos ya comentados en otros apartados. Asimismo, el apartado de discusión y conclusiones debe incluir las implicaciones y líneas para futuras investigaciones.

i. Agradecimientos (opcionales):

El *Council Science Editors* recomienda a los autor/es especificar la fuente de financiación de la investigación. Se considerarán prioritarios los trabajos con aval de proyectos competitivos nacionales e internacionales. En todo caso, para la valoración científica del manuscrito, este debe ir anonimizado con XXXX solo para su evaluación inicial, a fin de no identificar autores y equipos de investigación, que deben ser explicitados en la Carta de Presentación y posteriormente en el manuscrito final.

j. Referencias:

Las citas bibliográficas deben reseñarse en forma de referencias al texto. Bajo ningún caso deben incluirse referencias no citadas en el texto, ni tampoco deben ser incluidas citas solamente en el texto sin contener su respectiva referencia. Su número debe ser suficiente para contextualizar el marco teórico con criterios de actualidad e importancia.

Se presentarán alfabéticamente por el primer apellido del autor, siguiendo el estilo Harvard, que se describe a continuación y/o que se puede presentar con el gestor de citas del procesador de texto utilizado.

3.2 Normas para las referencias

3.2.1 Como se cita en el texto

Harvard es un estilo de citación que permite colocar los dos apellidos del autor (muchas veces éstos aparecen separados con un guión), si es que los presenta. Caso contrario se utiliza un solo apellido, como es usual en la tradición anglosajona.

Un autor: Samaniego (2012); (Samaniego, 2012); Valdés-Pérez (2016); (Valdés-Pérez, 2016); (Valdés Pérez, 2016); Valdés Pérez (2016).

Hasta tres autores: Samaniego, Vásquez y Torres (2010); (Samaniego, Vásquez y Torres, 2010).

Más de tres autores: Samaniego *et al.* (2010); (Samaniego *et al.*, 2010)

3.2.2 Referencias

a. Artículo de revista (incluir siempre el DOI del artículo o en lo posible la dirección electrónica URL del artículo):

Arnold, M. y Osorio, F. (1998) Introducción a los Conceptos Básicos de la Teoría General del Sistemas. Revista Cinta de Moebio [en línea], (3). Universidad de Chile. Disponible en <<https://goo.gl/FwjAqo>>[consulta: 20 enero 2005].

Dhillon, B. (2004) Should Doctors Wear Ties? Medical Monthly [en línea], 3 (1), 55-88. Disponible en <<https://goo.gl/pHzUxJ>>[consulta: 20 abril 2006].

b. Libros completos:

Un Autor:
Holt, DH 1997, Management principles and practices, Prentice Hall, Sydney.

Dos Autores:
McCarthy, EJ, William, DP & Pascale, GQ 1997, Basic marketing, Irwin, Sydney.

Tres o más autores:
Bond, WR, Smith, JT, Brown, KL & George, M 1996, Management of small firms, McGraw-Hill, Sydney.

c. Medios electrónicos:

Reed, S 2015, 'Shift to lower-carbon energy is too slow, report warns', New York Times, 9 November. Available from: <https://goo.gl/iczP53>. [10 November 2015].

Es prescriptivo que todas las citas que cuenten con DOI (Digital Object Identifier System) estén reflejadas en las Referencias (pueden obtenerse en <http://goo.gl/gfruh1>). Todas las revistas y libros que no tengan DOI deben aparecer con su link (en su versión online, en caso de que la tengan, acortada, mediante Google Shortener: <http://goo.gl>

Los artículos de revistas deben ser expuestos en idioma inglés, a excepción de aquellos que se encuentren en su idioma de origen, caso en el que se expone en ambos idiomas utilizando corchetes.

Todas las direcciones web que se presenten tienen que ser acortadas en el manuscrito, a excepción de los DOI que deben ir en el formato indicado (<https://doi.org/XXX>).

3.3 Epígrafes

Los epígrafes del cuerpo del artículo se numerarán en arábigo. Irán sin caja completa de mayúsculas, ni subrayados, ni negritas. La numeración ha de ser como máximo de tres niveles: 1. / 1.1. / 1.1.1.

Al final de cada epígrafe numerado se establecerá un espacio.

4 Proceso de envío

Deben remitirse a través del sistema OJS previo registro en la dirección <<http://revistas.ups.edu.ec/index.php/granja/user/register>>de la revista, los siguientes archivos:

Archivo N°1: Cover Letter, Cesión de derechos y declaración de conflictos de interés: Descargue el modelo “cover letter”.

Archivo N°2: Presentación-portada: Este archivo (Word o Latex), contendrá tres apartados claramente identificables:

- a) Título en español e inglés, nombres y apellidos de los autores de forma estandarizada con número de ORCID, filiación y grado académico.
- b) Resumen, abstract, palabras claves y keywords.
- c) Una declaración de que el manuscrito se trata de una aportación original, no enviada ni en proceso de evaluación en otra revista, confirmación de las autorías firmantes, aceptación (si procede) de cambios formales en el manuscrito conforme a las normas y cesión parcial de derechos a la editorial (descargar “presentación-portada”).

Archivo N°3: Manuscrito totalmente anonimizado, conforme a las normas referidas en precedencia.

Archivo N°4: El autor de correspondencia deberá presentar una lista de 5 potenciales revisores del artículo que cumplan los siguientes criterios (descargar modelo “evaluadores sugeridos”):

- No ser del mismo país del autor de correspondencia. Por ejemplo, si el autor de correspondencia trabaja en Brasil, el revisor propuesto NO puede estar vinculado a instituciones del mismo país del autor de correspondencia, es decir, “Brasil”).

El formato de este archivo podrá realizarse en cualquier procesador de texto Word / LaTeX y se deberá aportar de cada potencial revisor la siguiente información:

- Nombres y Apellidos
- Filiación
- Grado académico
- Correo electrónico
- Código Orcid correspondiente

Indicar brevemente la pertinencia de dicho revisor para la evaluación del manuscrito

El no cumplimiento de algunas de los requisitos de la presente normativa podrá ser causal de rechazo AUTOMATICO del manuscrito. Tome el debido tiempo para completar de manera correcta el proceso de envío.

LA GRANJA:
REVISTA DE CIENCIAS DE LA VIDA

NÚMERO ESPECIAL

Dinámicas del Agua y los Páramos: Impactos y Estrategias de Conservación



“Corona de Nubes”

Allí donde el cielo besa la tierra, los páramos custodian, entre neblina y frailejones, los secretos del agua y de la vida.

Autor: ©Jonathan González Chuqui (2025)

Foto Portada: Lagunas de Ozogoché, Provincia de Chimborazo.

Descripción: Las lagunas de Ozogoché, ubicadas en el páramo del Parque Nacional Sangay, forman parte de un sistema hídrico esencial que regula el flujo de agua hacia ríos y comunidades. La vegetación de páramo actúa como una esponja natural, reteniendo la lluvia y liberándola gradualmente, lo que asegura el suministro incluso en épocas secas. La conservación de este ecosistema implica proteger su biodiversidad, y generar políticas que permitan mitigar los efectos del cambio climático y garantizar la sostenibilidad hídrica para las personas y la naturaleza.

Autor: ©Benito Guillermo Mendoza Trujillo (2025)

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA DEL ECUADOR

Juan Cárdenas Tapia, sdb

Rector

©Universidad Politécnica Salesiana

Turuhuayco 3-69 y Calle Vieja, Cuenca, Ecuador

Teléfono: (+593 7) 205 00 00 Fax: (+593 7) 408 89 58 Casilla postal 2074

Correo electrónico: srector@ups.edu.ec

Web: www.ups.edu.ec

Fortalezas

La Granja, Revista de Ciencias de la Vida es la primera revista científica del Ecuador que aborda las temáticas de Ciencias Ambientales, de la Tierra y sus líneas transdisciplinarias como Biotecnología, Ciencias Agropecuarias y Desarrollo Rural Sostenible, entre otras. Publicada por la Universidad Politécnica Salesiana en doble formato: impreso y on-line con periodicidad semestral, todos sus artículos se presentan en español e inglés. 23 años de edición y 330 artículos científicos publicados; editada por Abya-Yala con más de 48 años de experiencia en Ecuador.

La Granja tiene presencia en 96 bases de datos internacionales, plataformas de evaluación de revistas, directorios selectivos, portales especializados, catálogos hemerográficos, como: SCOPUS (Q3), ESCI, Emerging Sources Citation Index ESCI de la Web of Science, MIAR, EBSCO, CIRC, LATINDEX, DOAJ, REDIB, DIALNET, REDALYC, BASE, entre otros.

Trabaja con un riguroso y transparente sistema peer review doble ciego de evaluación de manuscritos, sin costo, realizado por un consejo de revisión con 280 reconocidos investigadores de países de todo el mundo.

La administración de manuscritos se realiza a través del Sistema OJS 3, de la Fundación de Ciencia y Tecnología, con compromisos éticos publicados para la comunidad científica de transparencia y puntualidad; revisión de antiplagio realizada a través de Ithenticat y Similarity Check.

Alto nivel de visibilización con múltiples sistemas de búsqueda, DOI, ORCID, PDF dinámicos, xml jats, epub, con conexión a gestores documentales como Mendeley, RefWorks, EndNote y redes sociales científicas como Academia.edu y ResearchGate. Accesible digitalmente a texto completo, de forma gratuita, para toda la comunidad científica e investigadores de todo el mundo en apoyo a la política de Open Access y Early Access.

Proceso de evaluación por pares

Todos los manuscritos deben ser consignados a través del sistema Open Journal System (OJS 3), que garantiza el registro electrónico y auditable de las interacciones entre la publicación y los autores. Una vez consignados, el Consejo de Editores revisa que los originales cumplan con el objetivo y alcance de la publicación, así como con las normas de autores.

El proceso de revisión íntegro, desde el momento del depósito de los manuscritos a través del OJS 3 hasta la finalización de las revisiones ocupa un tiempo medio de 12-16 semanas, salvo incidencias. Los revisores, a su vez, también deben cumplir unas normativas de revisores y el código ético de revisores.

Antiplagio

Todos los manuscritos sometidos a revisión en *La Granja Revista de Ciencias de la Vida*, son inspeccionados por una disciplinada política antiplagio que vela por la originalidad de los artículos. Para ello se utilizan distintos servicios especiales como el sistema Ithenticate, que analiza los textos en busca de coincidencias gramaticales y ortotipográficas, lo que garantiza que los trabajos sean inéditos y asegure cumplir con los estándares de calidad editorial que avalen producción científica propia.

Asimismo, *La Granja* pone a disposición de autores y revisores, así como de la comunidad científica, un conjunto de herramientas específicas en la detección del plagio: Turnitin, Grammarly, Plagium, Copionic, WriteCheck PaperRater, Plagarisma.net, Viper Plagiarism Scanner y Similarity (CrossCheck). Se trata de un conjunto de interfaces de libre acceso y de pago, que supervisan la originalidad de cualquier manuscrito y permiten controlar el plagio.