

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

LA GRANJA 43

REVISTA DE CIENCIAS DE LA VIDA

Vol. (1)



NÚMERO ESPECIAL
CALIDAD DE VIDA, DESARROLLO Y
RESPONSABILIDAD SOCIAL, CAMBIO
CLIMÁTICO Y MEDIOAMBIENTE



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

MISCELÁNEOS

Transformaciones ambientales y sustentabilidad territorial en América Latina

Modelo EGCI para evaluar prácticas sostenibles del uso del agua

Variabilidad meteorológica y su impacto en las actividades amazónicas agropecuarias

Riqueza y adopción del monocultivo en Ecuador

Optimización de la hidrólisis ácida para la obtención de glucosa a partir de residuos agrícolas

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 Calidad de Vida y Sostenibilidad (Guest Editors of the Special Issue of Quality of life and sustainability)

PhD. Lisandro José Alvarado-Peña,
Universidad Tecnológica de Escuinapa, México.
PhD. Ma. Loecelia Guadalupe Ruvalcaba Sánchez,
Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial, México.
PhD. Aparecida Luzia Alzira Zuin,
Universidad Federal de Rondonia, Brasil.
PhD. Narcisa Requelme,
Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.
PhD. Enrique Navarro Jurado,
Universidad de Málaga, España.

Editores de Sección (Section Editors)

Ciencias de la Tierra (Earth sciences)

PhD. Thomas Condom,
Institut de Recherche Pour Le Développement, Francia
PhD. César Iván Álvarez,
University of Augsburg, Alemania
PhD. 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,
Universita 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 Rocío Rodríguez,
Universidad de Cádiz, España.
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,
Universita 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 CÁTE-DRA 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)
Dr. Danny Vargas (Editor Asistente)

Servicio de Publicaciones (Publications Service)

Hernán Hermosa (Coordinación General)
Marco Gutiérrez (Soporte OJS)
Mariana Luna (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 Retiro (Final Photo)

Camino hacia las Alturas
Autor: Jonathan González Chuqui

LA GRANJA: REVISTA DE CIENCIAS DE LA VIDA

Volumen 43, Número 1, marzo 2026 – agosto 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/>



**ABYA
YALA** | UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
SALESIANA

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



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
Proff. León Escobar Moreira, SYNAPTRONIC, EE.UU.
Dr. Geovanni 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

Revisores Volumen 43 Número 1 (Reviewers Volume 43 Number 1)

- Dr. Luis Eduardo Ore Cierta , Universidad Agraria de la Selva, Perú
Dra. Giovanna Alejandra Cuesta Chávez , universidad Técnica de Ambato, Ecuador
Dr. Pedro Severino González, Universidad Católica del Maule, Chile
Dr. Oscar Jhan Marcos Peña Cáceres, Universidad Tecnológica del Perú, Perú
Dr. Edgar Romario Aranibar Ramos, Universidade de São Paulo, Brasil
Dra. Narcisa Requelme , Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador
Dr. Alfredo Zenén Domínguez González, Universidade do Estado de Mato Grosso, Brasil
Dr. Gumaro Álvarez Vizcarra, Universidad Pedagógica del Estado de Sinaloa, México
Dra. Rosita Graciela Espinoza Gavilanes, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador
Dr. John Jairo Pinargote Alava, Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Ecuador
Dra. Verónica Cevallos López, Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Ecuador
Dr. Guillermo Eduardo Armenta, Universidad Nacional de Colombia, Colombia
Dr. Julio Ordoñez, Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú SENAMHI, Perú
Dr. Sheila Serrano Vincenti, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador
Dra. Ximena Valencia Enríquez, Instituto Superior Tecnológico Tsáchila, Ecuador
Dr. Miguel Tuárez, Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López, Ecuador
Dr. Jaime Naranjo Morán, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador
Dr. Rafael Calle Chumo, Universidad de Chile, Chile
Dr. Christian Franco, Universidad de Sevilla, España
Dr. Jaime Soler Herrero, Universidad de Zaragoza, España
Dr. Raúl Camarillo, Universidad Tecnológica de México, México
Dr. Wilmer Pozo-Rivera, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Ecuador
Dr. Patricio Yáñez Moretta, Universidad Yachay Tech, Ecuador

El Consejo Editorial agradece profundamente a los revisores pares que colaboraron con su tiempo y experiencia para garantizar la calidad científica de los artículos publicados en este número.

ÍNDICE

Editorial	8
NÚMERO ESPECIAL: CALIDAD DE VIDA, DESARROLLO Y RESPONSABILIDAD SOCIAL, CAMBIO CLIMÁTICO Y MEDIOAMBIENTE	
Transformaciones ambientales en América Latina, una revisión crítica de las prácticas sustentables en los territorios Mayel Castillo, Lina Alfonso, Daniel Valderrama y Néstor Pachón.	13
El papel del NEAZDP en la movilidad social de la pobreza en el estado de Yobe, Nigeria. Mohammed Sanusi Sadiq e Isiyaku Jawa Grema.	34
Construcción de un instrumento basado en el modelo EGCI para medir prácticas sostenibles de uso del agua en la ciudadanía Jessica Müller, Angel Acevedo, Montserrat Sánchez, Irma Verges y Rina Álvarez.	67
Puntos críticos y dinámicas socioecológicas del tomate <i>Solanum lycopersicum L.</i> bajo cubierta en núcleos productivos colombianos Karla Rodríguez, Víctor Pulido, Carlos Moreno, Diego Rojas, Eduardo Espitia, Mauricio Camelo, Andrea del Pilar Villarreal y Yajaira Romero.	79
CIENCIAS DE LA TIERRA	
Variabilidad meteorológica y su impacto en las actividades agropecuarias de la Amazonía ecuatoriana en Pastaza (2011–2021) Brigitte Leiva, Julia Maza y Reni Vinocunga.	100
CIENCIAS AGRÍCOLAS	
Análisis cuantitativo de la riqueza de cultivos y la adopción de monocultivos en el Ecuador Cristian Vasco y Lourdes Caisaguano.	117
Propagación <i>in vitro</i> de banano <i>Musa spp.</i> por embriogénesis somática Jessenia Lucero, Jorge Manzano, Iliana Loaiza y Yamile Orellana.	132
Efectos del plomo y cromo en la germinación y arquitectura de raíz de plántulas de <i>Typha latifolia</i> (Typhaceae) Renato Oquendo, Loiret Fernández, Galo Pabón y Lucía Vásquez.	150
BIOTECNOLOGÍA	
Valorización de la cáscara de banano <i>Musa paradisiaca</i> como materia prima para la producción de biopolímeros Jimena Taco, Ronald Jiménez y María Soto.	166
Optimización de los factores de hidrólisis ácida para obtener glucosa de los residuos de banano, cacao, palma africana y bagazo de caña de azúcar Mónica F. Abril, Angélica M. Vele y Verónica Pinos.	178
Normas para autores	191

Estimadas y estimados lectores,

La edición especial de *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*, Vol. 43 No. 1, del mes de marzo de 2026, titulada “Calidad de vida, desarrollo y responsabilidad social, cambio climático y medio ambiente”, se erige como una contribución significativa al análisis científico y ético de los problemas que desafían la sostenibilidad contemporánea. La Granja, posicionada entre las diez revistas científicas con mayor relevancia en la publicación de investigaciones vinculadas a la sostenibilidad, reafirma su compromiso con la generación y difusión de conocimiento riguroso que aborda los desafíos ambientales, sociales y económicos de nuestro tiempo y región.

En un mundo que enfrenta profundas desigualdades y crisis ambientales globales, la ciencia tiene el deber de orientar el futuro hacia la justicia climática, la equidad social y la preservación de la vida en todas sus formas. Así, esta entrega aborda los enfoques ambientales y sociales desde distintas perspectivas de investigación, subrayando la necesidad de integrar el conocimiento científico con la responsabilidad ciudadana y la acción política.

Los artículos publicados analizan problemáticas urgentes como la degradación de los ecosistemas, las transformaciones

productivas sostenibles, la adaptación al cambio climático y la innovación tecnológica verde. Al mismo tiempo, ponen énfasis en temas centrales de la responsabilidad social y la calidad de vida, reconociendo que el bienestar humano no puede estar desligado de la salud de los ecosistemas, ni del respeto a la diversidad cultural y biológica. De esta manera, la sostenibilidad, tal como la presentan los autores de este número, no se concibe como un concepto abstracto, sino como una práctica transformadora que debe incorporarse a la educación, las políticas públicas, la gestión empresarial y la vida cotidiana.

Este número especial selecciona valiosas investigaciones que abarcan un análisis macro de las transformaciones regionales, así como estudios de sistemas productivos locales desde diversos enfoques y territorios. Desde una mirada holística del entorno, la sociedad y la cultura, Mayel Camila Castillo Ruge, Lina Paola Alfonso Chaparro, Daniel Alejandro Valderrama y Néstor Adolfo Pachón Barbosa, de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia presentan en el artículo “Transformaciones ambientales en América Latina”, una revisión crítica de las prácticas sustentables en los territorios. Se analizan estas prácticas y la necesidad de conside-

rarlas como desafíos ligados a las culturas, replanteando modelos de desarrollo con enfoque inclusivo, intercultural y ecológico.

Partiendo de un análisis de la efectividad del Programa de Desarrollo de la Zona Árida del Noreste (NEAZDP) como estrategia de mitigación de la pobreza, ejecutado en el estado de Yobe, en Nigeria durante el 2023, los investigadores Mohammed Sanusi Sadiq e Isiyaku Jawa Grema, de la Federal University Dutse (FUD), revelan cómo este programa disminuyó la pobreza uni y multidimensional especialmente en tres pilares relacionados a la calidad de vida: acceso a la educación, atención médica y generación de ingresos. Concluyen que, para mantener su impacto en el tiempo, se requiere implementar intervenciones continuas y específicas integrándolas a políticas públicas orientadas a la mitigación de la pobreza y el desarrollo inclusivo.

Por otro lado, frente a la escasez del agua a nivel domiciliario, las conductas de los usuarios de los servicios de agua de consumo humano son relevantes para garantizar la calidad de vida. En ese sentido, Jessica Müller-Pérez de la Universidad Popular Autónoma de Puebla, Ángel Acevedo-Duque de la Universidad Autónoma de Chile, Montserrat Sánchez Espinosa de la Universidad Popular Autónoma de Puebla, Irma Yomara Verges de la Universidad Autónoma de Chile y Rina María Álvarez-Becerra de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, en su artículo "Construcción de un instrumento basado en el modelo EGCI para medir prácticas sostenibles de uso del agua en la ciudadanía" determinaron la intención de

la ciudadanía para adoptar prácticas sostenibles para el cuidado del agua. Aplicando un modelo basado en la Economía del consumo que articula cuatro dimensiones críticas: Gestión sostenible del agua, Compromiso moral e Intención de prácticas sostenibles (EGCI), evidenciaron que el compromiso moral y el ahorro del agua influyen en el comportamiento de la población. Resaltan la necesidad de promover la educación ambiental con énfasis en la gestión sostenible del agua y el diseño de estrategias orientadas a disminuir el desperdicio e incrementar la eficiencia del uso del agua residencial en territorios donde este elemento de la naturaleza se agota de forma alarmante.

La calidad de vida también se encuentra estrechamente vinculada a la salud de los sistemas socioecológicos rurales, especialmente aquellos que sostienen la seguridad alimentaria. La investigación llevada a cabo en Colombia, en Cundinamarca en los municipios de Cáqueza, Choachí y Fómeque; y Boyacá, municipios de Sutamarchán, Santa Sofía, Sáchica, Tinjacá y Villa de Leyva, el equipo investigador liderado por Karla Juliana Rodríguez-Robayo, Víctor Camilo Pulido-Blanco, Carlos Andrés Moreno-Velandia, Diego Alejandro Rojas-Ramírez, Eduardo María Espitia-Malagón, Mauricio Camelo-Rusinque, Andrea del Pilar Villarreal-Navarrete y Yajaira Romero-Barrera, de la Corporación colombiana de investigación agropecuaria AGROSAVIA, identificaron puntos críticos de los componentes sociales, ambientales, productivos y de gobernanza del sistema socioecológico del cultivo de tomate, los cuales son determinantes para fomentar la transición de estos hacia modelos de pro-

ducción sostenible puesto que cobran importancia por ser los que proveen de servicios ecosistémicos para la producción y calidad de vida de los productores y por ende de los consumidores.

En conjunto, los artículos científicos compilados en este número especial confirman que el abordaje de la calidad de vida tiene que darse desde un enfoque multi y transdisciplinario. La cultura, la tecnología, el entorno social y ambiental determinan prácticas que pueden elevar o deteriorar la calidad de vida de las poblaciones, especialmente rurales. Estamos seguros de que estos aportes académicos proporcionarán pautas para la generación de acciones puntuales y políticas públicas emergentes en procura del desarrollo sostenible y la mejora de la calidad de vida de las poblaciones urbanas y rurales.

Dentro de nuestra selección de artículos misceláneos, dentro de las Ciencias de la Tierra, presentamos el artículo titulado “Variabilidad meteorológica y su impacto en las actividades agropecuarias de la Amazonía ecuatoriana en Pastaza (2011–2021)”, elaborado por Brigitte Leiva-Zuñiga, Julia Maza-Valladolid y Reni Vinocunga-Pillajo, investigadoras de la Facultad de Ciencias de la Vida de la Universidad Estatal Amazónica (Puyo, Ecuador). Este estudio analiza la relación entre variables meteorológicas —temperatura, precipitación, humedad relativa y evaporación— y la productividad agrícola y pecuaria en el cantón Pastaza durante una década. La investigación aporta evidencia científica clave sobre la vulnerabilidad diferencial de cultivos estratégicos como cacao, café y caña de azúcar frente a la va-

riabilidad climática, destacando la mayor resiliencia del plátano y la yuca.

En la misma línea, el manuscrito “Análisis cuantitativo de la riqueza de cultivos y la adopción de monocultivos en el Ecuador” examina los determinantes socioeconómicos que influyen en la diversificación agrícola y la expansión del monocultivo en el país, utilizando datos de la Encuesta de Condiciones de Vida 2014 y técnicas multivariadas. El estudio evidencia que los hogares pobres, numerosos y liderados por población indígena tienden a mantener mayor riqueza de cultivos, mientras que factores como mayor educación, empleo extra-finca y cercanía a vías promueven la adopción de monocultivos. De esta manera, este trabajo contribuye al entendimiento estructural de la transformación de los sistemas productivos rurales bajo la presión de la economía de mercado. Su impacto social es significativo, pues fundamenta la necesidad de políticas públicas orientadas a la protección de la agrobiodiversidad como estrategia para la sostenibilidad ambiental, la soberanía alimentaria y la resiliencia de los territorios rurales ecuatorianos.

Desde las Ciencias Agrícolas, el estudio titulado “Propagación in vitro de banano (*Musa spp.*) por embriogénesis somática”, Jessenia Lucero-Murillo, Jorge Manzano-Torres, Iliana Loaiza-Maldonado y Yamile Orellana-García, del Instituto Superior Tecnológico Ismael Pérez Pazmiño (Machala, Ecuador), desarrollan una revisión sistemática sobre el uso de la embriogénesis somática como herramienta para la micropropagación y el mejoramiento genético del banano. La investigación analiza el potencial de esta técnica para la multi-

plicación masiva de plantas y su aplicación en procesos de transformación genética orientados a enfrentar enfermedades devastadoras como *Fusarium oxysporum f. sp. cubense* (Foc R4T) y *Mycosphaerella fijensis*. Esta investigación fortalece el campo de la biotecnología vegetal aplicada a cultivos estratégicos de exportación; aportando alternativas tecnológicas para sostener la competitividad del sector bananero, fundamental en la economía regional y en la generación de empleo rural.

Asimismo, el artículo “Efectos del plomo y cromo en la germinación y arquitectura de raíz de plántulas de *Typha latifolia* (Typhaceae)”, desarrollado por Renato Oquendo y Galo Pabón-Garcés de la Universidad Técnica del Norte (Ibarra, Ecuador), Loiret Fernández de la Universidad de La Habana (Cuba) y Lucía Vásquez-Hernandez, examina experimentalmente el impacto de metales pesados sobre la germinación y el desarrollo radicular de esta especie acuática. Los resultados evidencian que el cromo reduce drásticamente el porcentaje de germinación y afecta significativamente el área radicular, siendo evidente la importancia de la respuesta fisiológica de macrófitas acuáticas frente a la contaminación. Mostrando así la importancia de la gestión ambiental de cuerpos de agua y la necesidad de fortalecer políticas de control de contaminación por metales pesados en ecosistemas estratégicos como la Laguna de Yahuarcocha.

En el área de la Biotecnología, la investigación titulada “Valorización de la cáscara de banano (*Musa paradisiaca*) como materia prima para la producción de biopolímeros”, Jimena Taco, Ronald Jiménez

y Maria Soto, del Instituto Superior Tecnológico Tsáchila, investigan el desarrollo de biopelículas a partir de residuos agroindustriales de banano. El estudio evalúa parámetros fisicoquímicos como viscosidad, absorción de humedad y permeabilidad al vapor de agua bajo diferentes condiciones de procesamiento y concentraciones de glicerol. Contribuyendo al campo de la química verde y la ingeniería de biomateriales. El impacto social de esta investigación es particularmente significativo en el contexto de la crisis global por contaminación plástica, al proponer alternativas sostenibles que además promueven la economía circular y el aprovechamiento de residuos agrícolas.

Y finalmente, el artículo “Optimización de los factores de hidrólisis ácida para obtener glucosa de los residuos de banano, cacao, palma africana y bagazo de caña de azúcar”, de Mónica F. Abril-González, Angélica M. Vele-Salto y Verónica Pinos-Vélez, del IRCMA y la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad de Cuenca (Eco-Campus Balzay, Ecuador), optimiza experimentalmente las condiciones para maximizar la obtención de glucosa a partir de biomasa residual mediante un diseño factorial, identifican como condiciones óptimas 120 °C, 150 minutos y 1% de ácido sulfúrico, destacando el alto rendimiento del bagazo de caña y del raquis de palma. Siendo esta investigación un aporte más a la transición hacia matrices energéticas más sostenibles, el aprovechamiento de residuos agroindustriales y la reducción de la dependencia de combustibles fósiles en Ecuador.

Bajo este contexto, las investigaciones aquí reunidas destacan que tanto los procesos de investigación como los de enseñanza-aprendizaje deben estar orientados hacia la construcción de valores de respeto, solidaridad y empatía con el entorno natural. La calidad de vida, desde esta perspectiva, no se limita a los indicadores económicos, sino que se amplía a la equidad en el acceso a la educación, la salud, los servicios ambientales y la participación colectiva en la toma de decisiones. Esta edición especial invita a la reflexión sobre cómo la ciencia de la vida puede y debe transformarse en una ciencia para la vida: una ciencia inclusiva, ética y capaz de fortalecer el diálogo entre el conocimiento técnico y los saberes ancestrales. Los estudios publicados reflejan el compromiso de la revista con la difusión de resultados

interdisciplinarios que sirvan para diseñar políticas sostenibles de largo plazo. En conjunto, los artículos recopilados constituyen una llamada a la cooperación científica y a la acción compartida frente a los desafíos globales.

Con este número especial, *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida* reafirma su compromiso con la difusión del conocimiento responsable, la promoción del pensamiento crítico y la construcción de una cultura global de sostenibilidad. Agradecemos a los investigadores, revisores, instituciones académicas y lectores que hacen posible este espacio de encuentro y reflexión, orientado hacia la defensa del planeta y la mejora de la calidad de vida de todos sus habitantes.

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. Lisandro José Alvarado-Peña
Universidad Tecnológica de Escuinapa. Red REOALCEI, México
EDITOR INVITADO

PhD. Narcisa Requelme
Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador
EDITORA INVITADA



TRANSFORMACIONES AMBIENTALES EN AMÉRICA LATINA, UNA REVISIÓN CRÍTICA DE LAS PRÁCTICAS SUSTENTABLES EN LOS TERRITORIOS

ENVIRONMENTAL TRANSFORMATIONS IN LATIN AMERICA, A CRITICAL REVIEW OF THE SUSTAINABLE PRACTICES IN THE TERRITORIES

Mayel Camila Castillo Ruge *, Lina Paola Alfonso Chaparro , Daniel
Alejandro Valderrama  y Néstor Adolfo Pachón Barbosa 

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Grupo de Investigación WAIRA Ambiente Comunidad y Desarrollo. Tunja, Colombia. [https://ror.org/04vdmkb59]

*Autor para correspondencia: mayel.castillo@uptc.edu.co

Manuscrito recibido el 13 de septiembre de 2024. Aceptado, tras revisión el 30 de mayo de 2025. Publicado el 1 de marzo de 2026.

Resumen

Las prácticas sustentables son un conjunto de estrategias conductuales dirigidas a satisfacer las necesidades humanas dentro de un marco histórico, cultural y comunitario específico, destacando la relación armoniosa con el entorno natural, la sociedad y la cultura. Estas prácticas se consideran como pilares fundamentales en la promoción de comportamientos sustentables en las comunidades locales, urbanas, campesinas, educativas y otras, adoptando un enfoque participativo para su implementación. En un contexto como LATAM y el Caribe, la necesidad de incorporar las prácticas sustentables surge de los desafíos ambientales generados por los procesos históricos del desarrollo extractivista y disociados de las culturas originarias, siendo necesario replantear los modelos de desarrollo hacia enfoques que prioricen la equidad, ética y justicia ambiental. El estudio tiene como objetivo identificar las investigaciones sobre el abordaje teórico y procedimental de las prácticas sustentables en el contexto latinoamericano. Se realiza una revisión sistemática de 200 artículos académicos que abordan los enfoques teóricos y procedimentales de estas prácticas en Latinoamérica durante el periodo 2010–2024. Los resultados, organizados por año de publicación, tipo de estudio, métodos de recolección de datos y poblaciones de estudio, revelan cómo las prácticas sustentables han evolucionado y se han fortalecido en diversos contextos integradores, como comunidades educativas, campesinas e indígenas. Este análisis proporciona una visión detallada del panorama actual de la sustentabilidad ambiental, contribuyendo significativamente al conocimiento académico y sirviendo de base para futuras investigaciones y políticas públicas orientadas a fomentar una transformación cultural hacia un desarrollo comunitario más equitativo, justo y responsable con la naturaleza.

Palabras clave: Sustentabilidad, Comunidades, Cultural, América Latina, Ambiental.

Abstract

Sustainable practices are a set of behavioral strategies aimed at satisfying human needs within a specific historical, cultural, and community framework, emphasizing the harmonious relationship with the natural environment, society, and culture. These practices are considered fundamental pillars in the promotion of sustainable behaviors in local, urban, rural, educational, and other communities, adopting a participatory approach for their implementation. In a context such as Latin America and the Caribbean, the need to incorporate sustainable practices arises from the environmental challenges generated by the historical processes of extractivist development dissociated from native cultures, making it necessary to rethink development models towards approaches that prioritize equity, ethics, and environmental justice. The study aims to identify research on the theoretical and procedural approach to sustainable practices in LATAM context. A systematic review of 200 academic articles addressing the theoretical and procedural approaches to these practices in Latin America during the period 2010–2024 is carried out. The results, organized by year of publication, type of study, data collection methods, and study populations, reveal how sustainable practices have evolved and strengthened in diverse inclusive contexts, such as educational, peasant, and indigenous communities. This analysis provides a detailed overview of the current landscape of environmental sustainability, contributing significantly to academic knowledge and serving as a basis for future research and public policies aimed at fostering a cultural transformation towards a more equitable, just, and responsible community development with nature.

Keywords: Sustainability, Communities, Cultural, Latin America, Environmental.

Forma sugerida de citar: Castillo-Ruge, M., Alfonso-Chaparro, L., Valerrama, A. y Pachón-Barbosa, N. (2026). Transformaciones ambientales en América Latina, una revisión crítica de las prácticas sustentables en los territorios. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*. Vol. 43(1):13-33. <https://doi.org/10.17163/lgr.n43.2026.01>.

Orcid IDs:

Mayel Camila Castillo Ruge: <https://orcid.org/0000-0002-6941-5912>

Lina Paola Alfonso Chaparro: <https://orcid.org/0009-0003-3675-6547>

Daniel Alejandro Valderrama: <https://orcid.org/0000-0002-3360-3890>

Néstor Adolfo Pachón Barbosa: <https://orcid.org/0000-0002-2189-2218>

1 Introducción

Durante millones de años, la evolución humana ha vivido un proceso de adaptación y supervivencia, desde el Paleolítico hasta la contemporaneidad (Maya, 2015). En sus inicios, el ser humano desarrolló herramientas primitivas que fortalecieron su relación con la naturaleza (Carrillo, 2011). Las sociedades nómadas, en su búsqueda por satisfacer las necesidades básicas, aprovecharon los recursos del entorno y crearon métodos de comunicación que facilitaron su adaptación (Serrano, 2007).

Con el fin del Paleolítico, surgieron transiciones clave como el Neolítico, cuando el ser humano adoptó la agricultura y la domesticación de animales, estableciendo sociedades sedentarias y organizadas que sentaron las bases de la Soberanía y Seguridad Alimentaria (Leiva-Sajuria, 2014; Villalva y Inga, 2020). Este avance permitió la organización social y el surgimiento de las primeras grandes civilizaciones. Las revoluciones Neolítica e Industrial marcaron transformaciones profundas en la producción, organización social y economía, estableciendo un modelo que perdura hasta hoy (Sanchís, 2013, citando a Comín, 2011).

La Revolución Industrial trajo consigo una ruptura gradual con la naturaleza y el pasado, sustituyendo la energía humana por máquinas y dando origen a la economía moderna (Valdivieso, 2009). Sin embargo, este modelo se basa en externalidades y ha impuesto un pensamiento hegemónico que ignora los saberes locales y la sustentabilidad, generando una crisis ambiental sistémica (Delgado y Rist, 2010; Porrás y Pérez, 2018).

El panorama actual exige un cambio profundo en la percepción humana, pasando de ser administradores de la naturaleza a ser parte integral del sistema ambiental (Mejía-Cáceres y cols., 2018). Este planteamiento implica reconocer que la crisis se debe a la cultura moderna, caracterizada por la guerra y la industrialización desmedida, por lo que requiere una revisión desde múltiples perspectivas (Noguera de Echeverri, 2011; Sarmiento y Larrinaga, 2021). Entre ellas, las propuestas como el

Desarrollo Sostenible conceptualizado en el informe de Brundtland en 1987, planteada en sus inicios como alternativa de desarrollo para conciliar los problemas ambientales y el crecimiento económico, la cual no ha generado cambios importantes respecto a los problemas ambientales en la mayoría de los países (Eschenhagen, 2015). Por lo tanto, surge la necesidad de un nuevo enfoque, como el Desarrollo Sustentable, que promueve un desarrollo centrado en la sustentabilidad desde la base de las relaciones naturales, sociales y culturales (Gómez, 2014; Carapia, 2022).

El Manifiesto por la Vida, apoyado por académicos latinoamericanos como Enrique Leff, es una iniciativa liderada por el PNUMA en el marco del foro de ministros de Medio Ambiente de América Latina y el Caribe (Gudynas, 2014), y es una propuesta dirigida hacia una ética para la sustentabilidad ambiental (SA), enfocada en una nueva racionalidad social, local y productiva (Coarasa y Pequeño, 2006). Este enfoque busca mantener el equilibrio entre el uso de elementos naturales y la preservación de la naturaleza (Sarmiento y Larrinaga, 2021), promoviendo prácticas y políticas que garanticen la conservación de la biodiversidad y el reconocimiento de comunidades marginadas por discursos corporativos.

Por lo tanto, la crisis ambiental en América Latina y el Caribe exige deconstruir la racionalidad moderna y adoptar una perspectiva biocéntrica (Leff y cols., 2019). En Latinoamérica, postulados como la racionalidad ambiental, el buen vivir, el Sumak Kawsay y el Desarrollo a Escala Humana proponen una SA basada en el diálogo de saberes comunitarios y el desarrollo local. En este contexto, la SA surge a partir de Prácticas Sustentables (PS) que buscan satisfacer las necesidades actuales sin comprometer las generaciones futuras (Sandoval-Escobar, 2012), tomando en cuenta los comportamientos locales y la autodependencia (Valenzuela-Van Treek y cols., 2021).

Este estudio tiene como objetivo identificar las investigaciones sobre las PS en Latinoamérica entre 2010 y 2024, para contribuir académicamente a las nuevas formas de entender la SA en América Latina y el Caribe, haciendo visibles las alternativas al desarrollo y los procesos investigativos.

2 Materiales y Métodos

Los parámetros metodológicos para el desarrollo de la presente investigación se direccionan mediante una visión integral, holística, cualitativa y descriptiva de la sustentabilidad ambiental y las prácticas sustentables en los contextos de América Latina. Por lo tanto, se determinó el alcance de tipo descriptivo, el cual pretende recoger la información de manera individual o colectiva sobre los aspectos conceptuales y divulgativos; así lo infieren Hernández y Mendoza (2018), al indicar que los estudios descriptivos “miden o recolectan datos y reportan información sobre diversos conceptos, variables, aspectos, dimensiones o componentes del fenómeno o problema a investigar” (p. 603).

En consecuencia, en este estudio se adoptó una metodología integral y descriptiva enfocada en la revisión sistemática de artículos académicos relacionados con las PS y la SA en Latinoamérica. La búsqueda y selección de documentos se realizó a través de bases de datos como Google Scholar, Redalyc, Scielo y Dialnet, utilizando palabras clave como “prácticas sustentables”, “sustentabilidad ambiental” y “América Latina”, cubriendo el periodo de 2010 a 2024. Los criterios de inclusión consideraron artículos con origen en países de Latinoamérica, publicaciones en español, inglés y portugués, y trabajos que abordaran explícitamente el tema en el título, resumen o palabras clave. Los criterios de exclusión eliminaron los duplicados y estudios que no se centraban en la SA, la ruta de búsqueda y la selección de la información se muestran en la Figura 1.

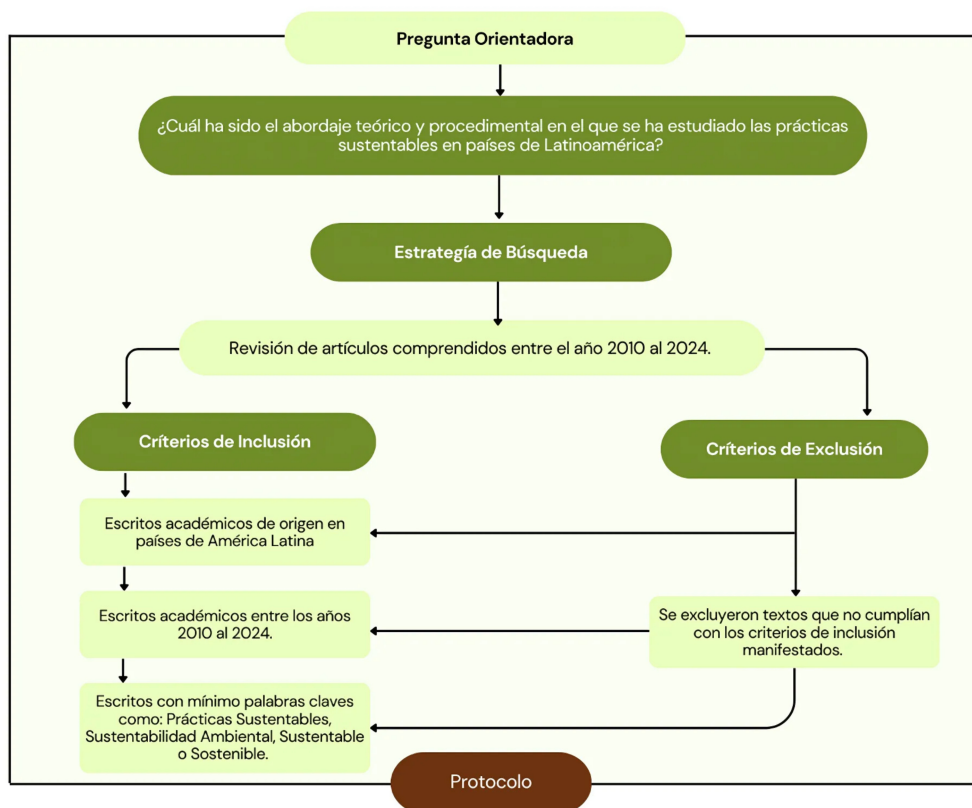


Figura 1. Protocolo utilizado en este estudio.

Según el protocolo de la Figura 1, el presente estudio busca responder a la siguiente pregunta de investigación:

¿Cuál ha sido el abordaje teórico y procedimental con el que se han estudiado las prácticas sustentables en países de Latinoamérica?

Este cuestionamiento surge de la necesidad de identificar las corrientes epistemológicas, enfoques conceptuales y paradigmas en los que se han fundamentado los estudios en Sustentabilidad Ambiental

(SA) y Prácticas Sustentables (PS), incluyendo la influencia de perspectivas como el diálogo de saberes, la agroecología, los modelos económicos alternativos y los procesos educativos. De igual manera, desde una dimensión metodológica, la investigación analiza otros aspectos que se basan en insumos como el tipo de estudio, las técnicas de recolección de datos, y los sujetos o poblaciones. En consecuencia, esta pregunta busca articular un análisis integral de la investigación sobre SA y PS en Latinoamérica.

Tabla 1. Categorías de Análisis de la SA.

No.	Categoría	Descripción
1	Construcciones epistemológicas sobre la SA	Esta categoría se refiere a las diversas formas en las que se han comprendido y abordado las PS, las aplicaciones en los campos de estudio y las interpretaciones según los métodos utilizados.
2	PS y diálogo de saberes	Se analizan las PS y su relación con el intercambio e integración de los conocimientos tradicionales de las comunidades en el paradigma sustentable. Asimismo, su relación con el conocimiento científico para establecer enfoques holísticos desde prácticas culturales con una perspectiva sustentable y manejo sociocultural de los saberes tradicionales, promoviendo el bienestar de los ecosistemas estratégicos.
3	PS y estudios sobre diversidad biológica	Se explora la relación entre las prácticas sustentables y la conservación de la diversidad biológica; se incluyen estudios como estrategias de conservación para la protección y uso de los recursos naturales.
4	PS y procesos educativos formales	Se mencionan estrategias educativas para el fortalecimiento de la sustentabilidad ambiental en los sistemas educativos formales, orientadas a la educación ambiental (EA) para la incorporación de las prácticas sustentables desde la cotidianidad.
5	PS, agroecología para la soberanía y seguridad alimentaria	Se relaciona la agroecología como estrategia sustentable en los sistemas de producción campesina y local. Se analiza la implementación de nuevas estrategias técnicas y procedimentales que fortalezcan la autonomía y autogestión de las comunidades.
6	SA en el marco de los conflictos ambientales	Se incorporan trabajos abordados en el contexto del conflicto, examinando causas y consecuencias de los desafíos ambientales para incidir en la búsqueda de estrategias para resolver los conflictos desde una mirada sustentable. Se integran aspectos como el bien vivir y el desarrollo sustentable.
7	SA y alternativas de modelos socioeconómicos	Se integran procesos investigativos que buscan la creación de alternativas sólidas para generar un equilibrio y dinámica entre lo sustentable y económico. Se encuentran trabajos como alternativas de planeación urbana inteligente denominada ciudades-rurales.
8	SA, resistencia y comunidades	Se consideran los procesos de resiliencia, empoderamiento y lucha de las comunidades que se organizan para incidir en los espacios participativos y colaborativos con relación a los desafíos y retos ambientales, en el fomento de PS.

De acuerdo con los datos recolectados, se procedió a organizar la información de algunos factores como el año de publicación, país de origen, tipo de escrito y estudio, población participante de cada investigación y la revisión o reflexión encontrada en los respectivos artículos. En este sentido, es importante mencionar que cada uno de estos factores permite indicar procesos establecidos en el periodo 2010–2024, facilitando la identificación de tendencias y patrones en la producción académica relacionada con el tema.

Para el análisis de la información se utilizó Python como herramienta cuantitativa, lo que permitió un tratamiento riguroso de los datos mediante técnicas estadísticas avanzadas. De igual forma, se estructuró un conjunto de categorías de análisis fundamentadas en los patrones emergentes dentro del corpus investigado. Por lo tanto, este software facilitó la sistematización de los resultados a partir de una serie de categorías de análisis con relación al tema de la Sustentabilidad Ambiental y Prácticas Sustentables en América Latina (Tabla 2). La información obtenida se organizó en categorías emergentes que surgieron durante el proceso de revisión, sintetizadas en la Tabla 1.

3 Resultados y Discusión

La revisión sistemática de 200 artículos sobre PS y SA en Latinoamérica revela un panorama dinámico y en evolución. Entre 2010 y 2024, la producción académica se ha concentrado en cuatro categorías principales: artículos científicos, libros de investigación, memorias de eventos académicos y trabajos de grado.

En la Figura 2, se refleja que los artículos científicos dominan con picos notables en 2016 y 2020, señalando un aumento significativo en la investigación durante esos años. Cabe resaltar que los libros de investigación y memorias de eventos académicos presentan una variabilidad notable, destacándose también en 2016, mientras que los trabajos de grado han aumentado considerablemente en los años recientes, especialmente en 2021 y 2022, reflejando un mayor enfoque en la investigación a nivel de pregrado y posgrado. Esto sugiere un interés creciente y un esfuerzo continuo en el estudio de la sustentabilidad ambiental en la región, contribuyendo significativamente al conocimiento académico y a la implementación de prácticas sustentables.

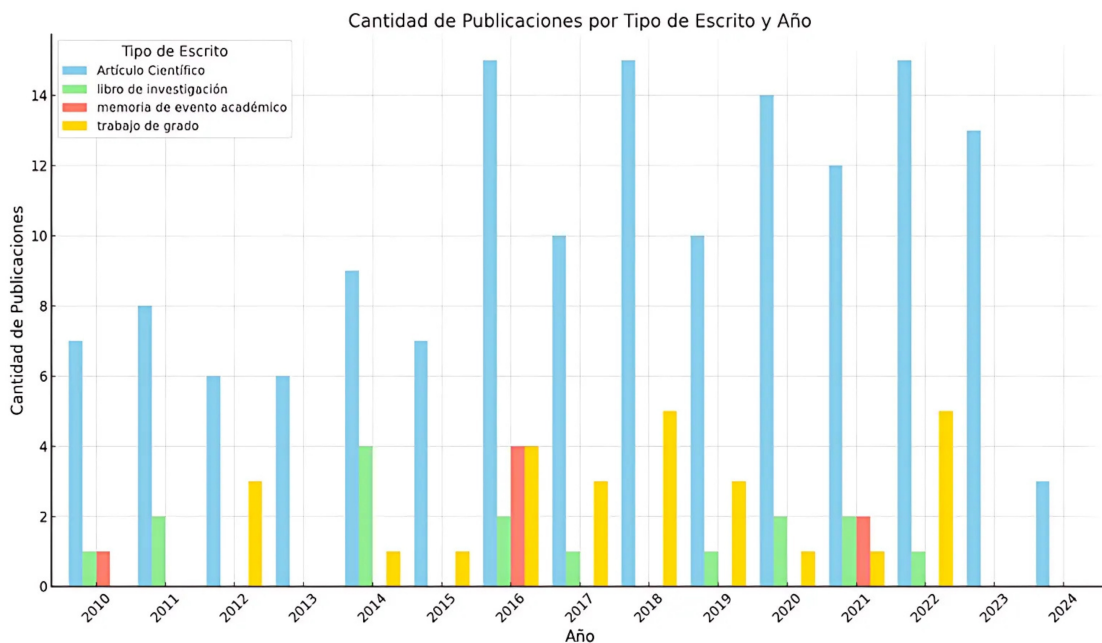


Figura 2. Resultados de la cantidad de publicaciones por tipo de manuscrito y año.

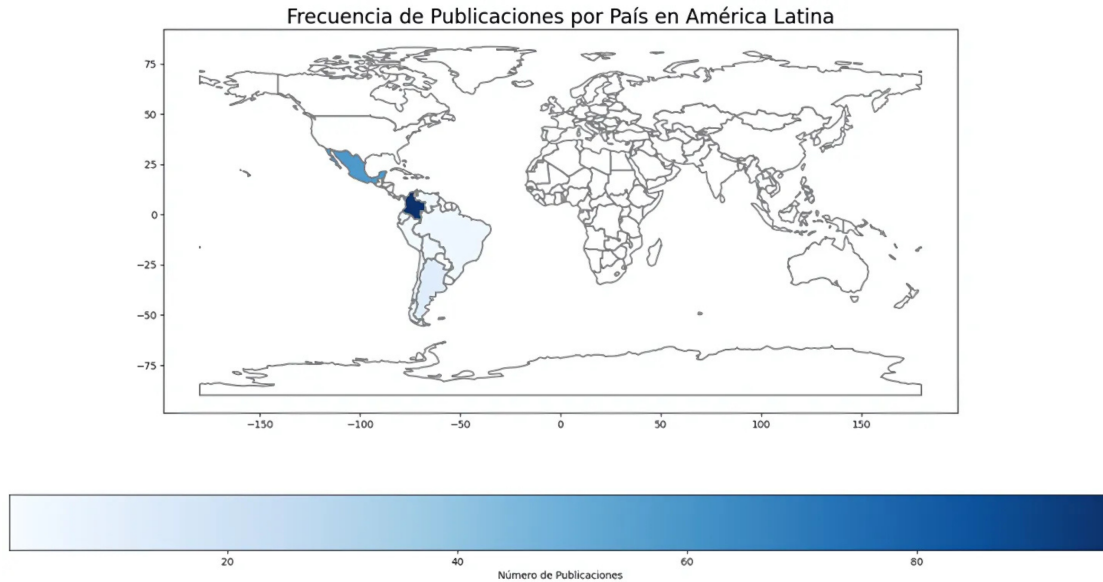


Figura 3. Representación gráfica de la incidencia de publicaciones por país en Latinoamérica.

La distribución geográfica de la producción bibliográfica en Latinoamérica, representada en la Figura 3, muestra una clara concentración en Colombia y México, con 97 y 58 publicaciones respectivamente. Esto posiciona a Colombia como líder en la investigación sobre PS, seguido de México. Argentina tiene 12 publicaciones, y Chile y Ecuador 6 cada uno, representando una contribución moderada. En contraste, países como Bolivia, Brasil y Venezuela aportan 5 publicaciones cada uno, mientras que Perú, Cuba y Uruguay tienen una producción significativamente menor, con 3, 2 y 1 publicaciones, respectivamente.

La distribución de publicaciones académicas en América Latina destaca notablemente en Colombia y México, representando juntos más de la mitad del total de publicaciones revisadas. Esta concentración sugiere un fuerte enfoque en la investigación y desarrollo de prácticas sustentables en estos países. Por otro lado, la menor cantidad de publicaciones en países como Perú, Cuba y Uruguay indica áreas con potencial para el crecimiento académico, destacando la necesidad de iniciativas de colaboración local y regional para incrementar el reconocimiento y desarrollo de prácticas sustentables, así como la producción de investigación en este campo.

La Tabla 2 identifica las 10 revistas con mayor cantidad de publicaciones sobre PS. "Gestión y Ambiente" lidera con 8 artículos, seguido por Cuadernos de Desarrollo Rural con 6 y Community Development Journal con 5, destacando temas de gestión ambiental y desarrollo rural. Se evidencia que la investigación sobre PS está bien distribuida entre diferentes áreas de estudio, lo que es crucial para una comprensión holística y el desarrollo de estas prácticas en los territorios.

4 Población sujeto de estudio y cantidad de publicaciones

En la Figura 4 se presentan los resultados obtenidos con relación a la población objeto de estudio y la cantidad de publicaciones en el periodo de 2010 al 2024. Se destaca que aproximadamente el 40% (75) de las publicaciones han concentrado sus investigaciones en grupos campesinos, indígenas y comunitarios, donde se mencionan aspectos relevantes con relación al territorio, los ecosistemas y las prácticas sustentables (Auer y cols., 2022). Asimismo, se encuentran trabajos como el de Calvo (2019), donde se postula la creación de alternativas y prácticas sustentables en la Zona de Reserva Campesina del Valle del Río Cimitarra. Por otro lado, las organizaciones y asociaciones sociales representaron el 25%

de aparición en los estudios, revelando que se han realizado investigaciones desde un ámbito interinstitucional que reconoce el rol de los actores sociales como agentes activos de las comunidades para la creación de procesos dirigidos a la economía comunitaria (Payarés-Comas y Garnica-Morales, 2010).

Además, el 8% de las investigaciones se enfocaron en mitigar los efectos negativos de las prácticas

antropocéntricas sobre los ecosistemas y la diversidad biológica, con trabajos destacados como los de Daga y cols. (2022) y Bernal (2017). Finalmente, estudios sobre entidades del sector público subrayan su contribución a la sustentabilidad ambiental a través de modelos de ordenamiento territorial y construcción social, como lo demuestran las investigaciones de Rincón-Martínez (2012).

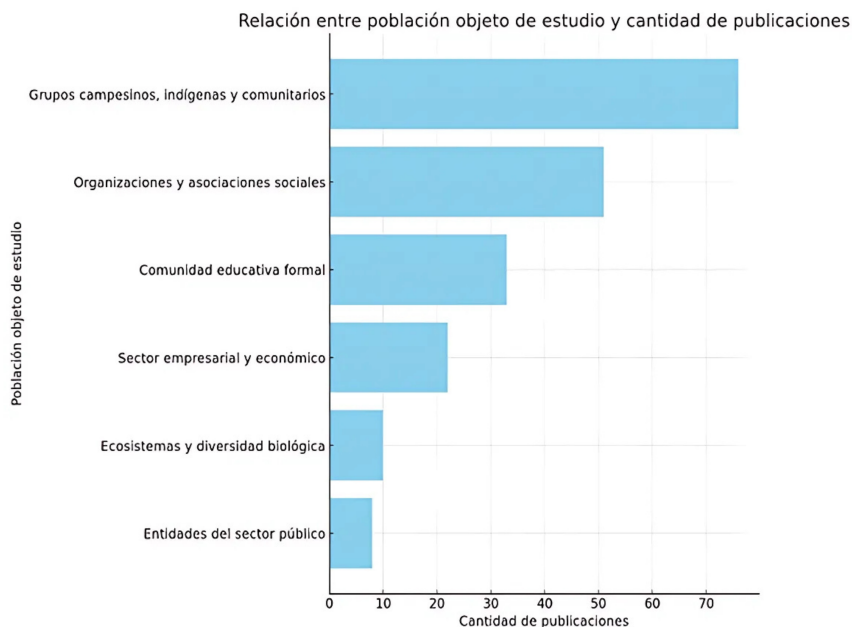


Figura 4. Relación entre la población sujeto de estudio y la cantidad de publicaciones.

Tabla 2. Top 10 de revistas latinoamericanas con mayor cantidad de publicaciones en PS Prácticas Sustentables.

No.	Revista	No. Publicaciones
1	Gestión & Ambiente	8
2	Cuadernos de Desarrollo Rural	6
3	Community Development Journal	5
4	Estudios Sociales: Revista de Alimentación Contemporánea y Desarrollo Regional	4
5	La Granja: Revista de Ciencias de la Vida	3
6	Sociedad y Ambiente	3
7	Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de Colombia	3
8	Agricultura, Sociedad y Desarrollo	2
9	Biografía. Escritos sobre la Biología y su Enseñanza	2
10	Bitácora Urbano Territorial	2

5 Metodologías de investigación

La Figura 5 destaca que los estudios cualitativos predominan en la investigación con más de 160 publicaciones, reflejando una marcada preferencia por métodos que permiten una exploración profunda y contextualizada. Los estudios mixtos ocupan el segundo lugar, con aproximadamente 30 publicaciones, lo que indica un esfuerzo por combinar enfoques para obtener una visión más completa. En

contraste, los estudios cuantitativos son los menos comunes, con menos de 10 publicaciones, lo que sugiere una menor inclinación hacia métodos centrados en la medición y análisis estadístico.

Para fortalecer este campo, sería beneficioso equilibrar los diferentes tipos de estudios, promoviendo la diversidad metodológica y la complementariedad entre los enfoques cualitativos y cuantitativos.

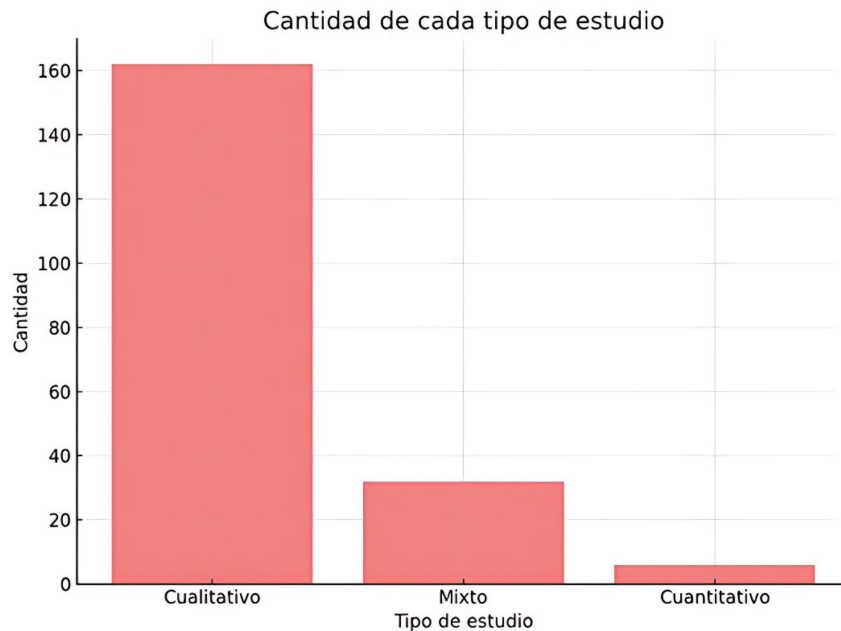


Figura 5. Resultados por tipo de estudio.

6 SA en Latinoamérica y el Caribe

La SA en América Latina y el Caribe cuestiona las bases del pensamiento moderno occidental, el desarrollo extractivista y las lógicas colonialistas que han moldeado las relaciones entre la sociedad moderna y la naturaleza. Las nuevas tendencias del pensamiento en el contexto de Latinoamérica y el Caribe enfrentan un reto y oportunidad crucial, replanteando los modelos de desarrollo para garantizar la SA en los territorios. Como lo señala Slutzky (2012), la crisis constituye un proceso articulado en el que es necesaria la adopción de un camino hacia una SA.

En este panorama, se deben revertir las tendencias absolutistas que han dominado las dinámicas ambientales en los países de Latinoamérica y el Caribe (Leff, 2009), donde la riqueza biocultural de la región exige un enfoque que integre el diálogo de saberes, promoviendo las PS y alternativas al desarrollo basadas en la justicia ambiental y el respeto por los ecosistemas (Romero y Vázquez, 2012).

Entre los referentes de las nuevas tendencias en Latinoamérica se encuentra la racionalidad ambiental, centrada en la imposición de un desarrollo extractivista y tecnocrático que ha subordinado a los territorios y saberes tradicionales de los pueblos originarios de Latinoamérica y el Caribe (Leff, 2004). El post-extractivismo y la ética ambiental proponen

un enfoque para la SA desde el compromiso político con la justicia ecológica y social (Gudynas, 2014).

La SA y las luchas por la justicia social junto con los procesos educativos han sido pilares de un proyecto civilizatorio alternativo al modelo hegemónico moderno, que incluyen la educación crítica y liberadora de Paulo Freire (Paiva, 2004), siendo un puente con el diálogo de saberes, desafiando la hegemonía del conocimiento científico occidental para integrar las cosmovisiones de los pueblos originarios y campesinos (Cruz, 2020). La educación, desde esta perspectiva, se convierte en un acto político, ético y ambiental, capaz de reconstruir los vínculos entre el ser humano y la naturaleza.

Estos postulados incorporan discursos para la vinculación de la ética, la educación, la justicia social, el diálogo y la cultura en torno a las dinámicas ambientales, permitiendo percibir nuevas maneras de habitar y cohabitar en armonía con los territorios y la naturaleza, en el contexto del desarrollo y los pueblos originarios de Latinoamérica y el Caribe, o

como la denominaron Abya Yala. Por lo anterior, es necesario analizar la manera en la que se ha abordado la SA desde las PS en Latinoamérica y el Caribe mediante investigaciones académicas en este contexto.

La Figura 6 muestra la distribución de las categorías de análisis en estudios sobre prácticas sustentables, y ofrece una visión detallada de las áreas de enfoque predominantes en la investigación actual. Cada categoría representa un aspecto crucial de la sustentabilidad ambiental y muestra los estudios dedicados a ese tema en específico. Esta distribución no solo refleja las prioridades y tendencias en la investigación, sino también las áreas que podrían requerir mayor atención y desarrollo. A continuación, se realizará un análisis detallado de cada una de estas categorías, empezando por aquellas con mayor cantidad de estudios hasta las menos representadas, para comprender mejor las dinámicas y enfoques actuales en el campo de la sustentabilidad ambiental.

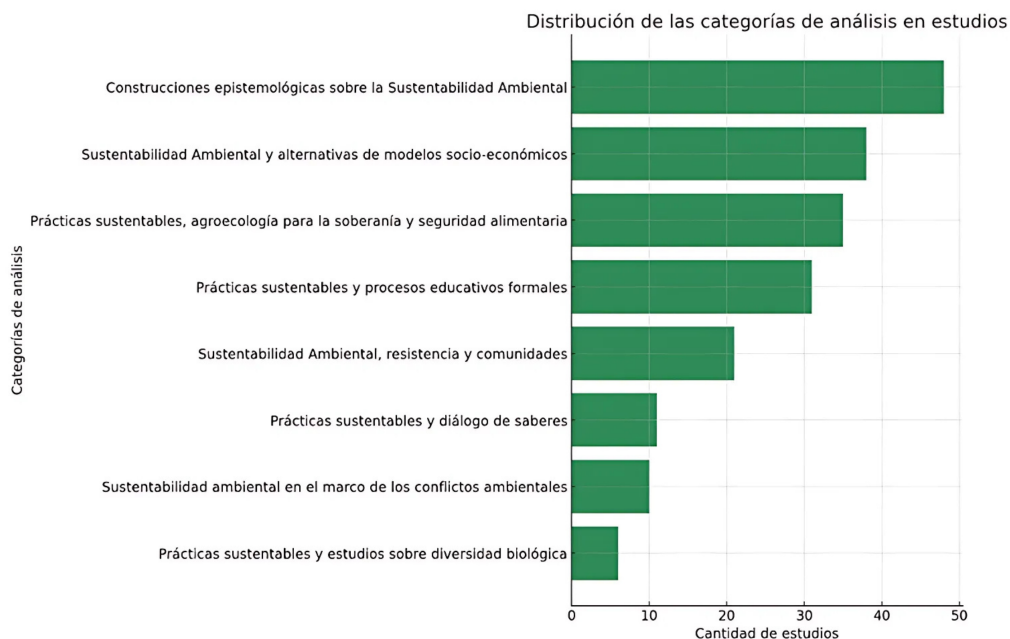


Figura 6. Resultados de las categorías de análisis sobre la SA en LATAM.

6.1 Construcciones epistemológicas sobre la SA

En el análisis de las construcciones epistemológicas sobre la SA se ha revisado una variedad de estudios que ofrecen enfoques críticos y metodologías diversas. Un ejemplo notable es el trabajo de Manfred Max-Neef, cuya obra es una crítica al productivismo y extractivismo en Latinoamérica, abogando por un desarrollo humano basado en fundamentos ecológicos a escala local, desafiando los modelos macroeconómicos tradicionales impuestos desde la colonia en LATAM. Este enfoque resalta la relevancia de aplicar teorías ecológicas a contextos locales para cuestionar el desarrollo convencional (Valenzuela-Van Treek y cols., 2021).

Un modelo significativo es el de EA para el desarrollo humano sustentable en la comunidad chontal de Olcuatitán, Tabasco. Basado en la tradición y saberes locales, este modelo promueve una EA crítica y constructivista, adaptada a las condiciones ecológicas y culturales de la comunidad. Su implementación ha demostrado eficacia en la formación de grupos comunitarios y en la generación de proyectos sustentables, resaltando la importancia de contextualizar la educación para lograr impactos duraderos.

Por otro lado, la subjetivación y ciudadanía en territorios ambientales latinoamericanos explora la integración de la política y epistemología para la emancipación social y epistémica. Este enfoque enfatiza la necesidad de reconocer la diversidad de actores y formas de conocimiento, utilizando metodologías etnográficas para desafiar las visiones hegemónicas de la ciencia, y propone una sistematización de experiencias que reconozca y reconstruya las prácticas de sectores históricamente dominados.

En el ámbito empresarial, los estudios sobre la replicación de buenas prácticas de sustentabilidad en empresas de consumo masivo en Colombia, y la estrategia de sustentabilidad ambiental en recursos humanos, revelan cómo las organizaciones pueden alinear sus prácticas con los objetivos del Desarrollo Sostenible desde la mirada eurocéntrica (Gómez, 2014).

Estos estudios promueven la comprensión de la resiliencia socioecológica y la necesidad de desa-

rollar sistemas más robustos y menos vulnerables para enfrentar las adversidades y la incertidumbre ambiental contemporánea. De igual forma, se demuestra la riqueza y diversidad de enfoques en la SA, subrayando la importancia de integrar los conocimientos locales, participativos y críticos para abordar los desafíos ambientales de manera holística y efectiva.

6.2 SA y alternativas de modelos socioeconómicos

La relación entre la SA y los modelos socioeconómicos alternativos es fundamental para abordar los desafíos globales y locales actuales; un ejemplo es el enfoque de Manfred Max-Neef sobre las necesidades humanas fundamentales, junto con la teoría del desarrollo humano de Amartya Sen, donde enfatizan la importancia de considerar las dimensiones económicas, culturales y sociales en el desarrollo. Estas teorías sugieren que las políticas económicas deben diseñarse teniendo en cuenta las condiciones sociales y culturales para abordar la pobreza de manera más efectiva y sustentable (Valenzuela-Van Treek y cols., 2021).

Otro ejemplo es la incorporación del turismo comunitario con un enfoque ambiental que muestra cómo los modelos alternativos pueden integrar la sustentabilidad, conservando la naturaleza y fortaleciendo a las comunidades locales mediante la educación y participación. Las experiencias en Colombia demuestran que este tipo de turismo puede generar beneficios económicos sustentables mientras se preserva el entorno natural.

Otro ejemplo es la gestión del recurso hídrico en industrias específicas, como las tenerías en Villapinzón. Este caso ilustra cómo las PS pueden mejorar la eficiencia económica y reducir el impacto ambiental. El poder integrar las políticas de gestión ambiental con las estrategias empresariales demuestra que la sustentabilidad empresarial no es solo viable, sino necesaria para la supervivencia a largo plazo.

En las áreas urbanas, la creación y aplicación de índices de sostenibilidad ambiental permiten identificar y abordar eficazmente las áreas que requieren intervención. El análisis de sostenibilidad urbana en la megalópolis de Ciudad de México muestra cómo las políticas públicas pueden mejorar la dis-

tribución en el marco de los desafíos actuales hacia la sustentabilidad, abordando problemas tanto ambientales como socioeconómicos, considerando la mitigación del cambio climático y la reducción de la huella ecológica.

En el ámbito rural, las prácticas socioespaciales y la preservación a través de la sustentabilidad son vitales. La implementación del agroecoturismo en México y las estrategias de desarrollo sustentable en el altiplano sur de Bolivia, como la producción de quinua, demuestran cómo las prácticas agrícolas sustentables, junto con las actividades ecológicas y culturales, pueden promover la sustentabilidad ambiental desde la perspectiva de los recursos naturales y mejorar la calidad de vida de las comunidades rurales.

En Colombia, las iniciativas como los Mercados Verdes integran la educación, la gestión y la SA, fomentando un desarrollo económico más equitativo. Se han generado una serie de alternativas enfocadas a la articulación e integración de la educación, gestión y sustentabilidad ambiental, mediante la creación de procesos denominados como los Mercados Verdes, los cuales comprenden productos ecológicos y prácticas comerciales responsables para ofrecer una oportunidad en las pequeñas y medianas empresas, adaptando nuevas demandas de consumo, y fomentando un desarrollo económico más sustentable y equitativo (Díaz y cols., 2016). Un estudio en El Cocuy, Boyacá, destacó la participación de grupos sociales en la producción y consumo de alimentos cultivados con prácticas tradicionales, promoviendo un uso responsable de la tierra y fortaleciendo la relación armoniosa entre la naturaleza, la sociedad y la cultura (Castillo y cols., 2023).

Estos modelos alternativos en LATAM y el Caribe no solo abordan las necesidades emergentes, sino que también promueven una economía más justa y sustentable, destacando la importancia del desarrollo local y la preservación cultural como ejes centrales para alcanzar la SA.

6.3 Prácticas Sustentables, agroecología para la soberanía y la seguridad alimentaria

Las PS en la agroecología representan un enfoque holístico e integral que aborda múltiples dimen-

siones de la sustentabilidad ambiental, abordadas desde un enfoque social, económico y cultural. Estas prácticas se encuentran muy enraizadas en el conocimiento ancestral y complementadas con innovaciones contemporáneas, que pretenden garantizar la soberanía y la seguridad alimentaria de las comunidades rurales, campesinas e indígenas. Estos estudios han demostrado que la implementación de estas prácticas puede conllevar a resultados positivos en términos de productividad agrícola, conservación ambiental y fortalecimiento social, como los trabajos de (Cardona y Sierra, 2023; Chaga, 2012; Chaparro, 2017).

Un estudio en el sureste de Buenos Aires, Argentina, investigó la relación entre el conocimiento de los servicios ecosistémicos y la adopción de PS. Los resultados indicaron que los agricultores con mayor nivel educativo y aquellos que residían fuera de sus fincas eran más propensos a adoptar la PS. Sin embargo, las barreras incluyen la incertidumbre económica y la complejidad operativa, lo que subraya la necesidad de apoyo técnico y financiero, así como de espacios para compartir conocimientos y experiencias (Auer y cols., 2022).

En Colombia, la investigación en la Zona de Reserva Campesina del Valle del Río Cimitarra reveló cómo las comunidades, a través de la organización y la resistencia, han logrado avanzar hacia la soberanía alimentaria, dignificando sus condiciones de vida. Estos hallazgos enfatizan la necesidad de políticas públicas que apoyen la revalorización de la economía familiar y faciliten la transición hacia la agroecología (Calvo, 2019).

Otro caso relevante en Boyacá, Colombia, estudió la autonomía alimentaria en fincas de agricultura familiar, donde se observó un proceso de reconversión hacia la agroecología. Este cambio ha fortalecido la agrobiodiversidad, la conservación de semillas y el autogobierno comunitario, destacando la interconexión entre la agroecología, los saberes ancestrales y la autonomía alimentaria (Lucco, 2019).

En México y Colombia, la medicina indígena y las prácticas culturales relacionadas con la agroecología han demostrado ser esenciales para mantener la salud comunitaria y la soberanía de la salud indígena, especialmente durante crisis como la pan-

demia del SARS-CoV-2. Este enfoque destaca la importancia de la soberanía de la salud indígena como una estrategia que vincula a la salud con la sustentabilidad y el equilibrio ecológico (Muñoz, 2022).

En el ámbito económico, los mercados verdes y las cadenas cortas de comercialización han demostrado su contribución a la sustentabilidad de los sistemas alimentarios. El proyecto Mercado Verde en Morelos, México, promueve la sustentabilidad, el consumo responsable y el comercio justo, fortaleciendo la economía local y la producción sustentable.

En Ecuador, la SA y PS mediante los sistemas hortícolas en San Joaquín se fortalecieron considerablemente por las prácticas ancestrales de rotación de cultivos, asociación y biodiversidad, que mejoran la producción y la calidad de vida de las familias campesinas (Pacheco y Ortiz, 2022).

La transición hacia las prácticas agroecológicas implica la transformación de las estructuras sociales y económicas que sustentan la producción agrícola. Los movimientos por la soberanía alimentaria y la agroecología demuestran que es posible construir sistemas alimentarios más justos y sustentables a través de la organización comunitaria, la solidaridad transnacional y la promoción de una identidad campesina global (Camacho y cols., 2022).

6.4 Prácticas sustentables y procesos educativos formales

Las PS integradas en los procesos educativos formales representan un enfoque innovador y necesario para formar ciudadanos conscientes y responsables con su entorno. Estas investigaciones destacan cómo las estrategias educativas, apoyadas en las tecnologías de la información y la comunicación (TIC), están transformando la enseñanza tradicional al promover una conexión directa entre los estudiantes y su entorno (Ruiz, 2021).

En este contexto, se requiere la educación formal para la creación y aplicación de PS que fomente la participación estudiantil en los proyectos comunitarios. Los programas educativos con objetivos contextualizados en el ambiente y la sostenibilidad y los sistemas de gestión ambiental en las universidades han demostrado ser efectivos en la formación

de ciudadanos comprometidos con el desarrollo sostenible (Tuay Sigua y cols., 2016; Marín, 2011).

La Universidad de Chile es un ejemplo de lo mencionado, pues mediante la colaboración institucional y la participación de las comunidades locales se ha promovido la responsabilidad social y el consumo sustentable (Severino-González y cols., 2021). Las iniciativas como los sistemas hortícolas en los centros educativos y el arte ecológico también integran la sustentabilidad con el aprendizaje y las expresiones artísticas (Carnicer y cols., 2020; Bernaschina, 2023).

La investigación de Flórez (2012) buscó integrar los actores sociales de los municipios de Sugamuxi y Tundama para comprender y desarrollar la dimensión ambiental a nivel local, resaltando la importancia de la colaboración entre la escuela y la comunidad para alcanzar los objetivos comunes en la EA y la Sustentabilidad.

En el ámbito universitario se destaca la experiencia de la Universidad Nacional de Colombia, donde se ha trabajado en la estructuración de la sustentabilidad dentro de la Facultad de Ingeniería. Esta iniciativa, basada en el realismo crítico y la teoría de la Estructuración de Anthony Giddens, busca formar a profesionales capaces de enfrentar los desafíos del desarrollo sustentable y proponer soluciones innovadoras (Cortés, 2018).

6.5 SA, resistencia y Comunidades

Algunos grupos han mostrado una notable capacidad de resistencia frente a desafíos ecológicos, sociales, políticos y económicos en sus territorios. Un ejemplo es el estudio de Barreiro Zamorano y cols. (2021) sobre el patrimonio biocultural como alternativa sustentable en el Parque Nacional Malintzin, México, que ilustra cómo la sustentabilidad ambiental (SA) se integra con las comunidades para adaptarse y resistir a los cambios en su entorno. En LATAM y el Caribe, las organizaciones femeninas han enfrentado con éxito los desafíos contemporáneos mediante el "Buen vivir" (Cerna y cols., 2022).

La resiliencia de estas comunidades ha impulsado a los movimientos que empoderan a las nuevas generaciones, combinando los conocimientos an-

cestrales con enfoques científicos contemporáneos. En Brasil, Fauth y Antunes (2016) destacan la valorización de los saberes tradicionales como base para construir las estrategias de sustentabilidad inclusivas y resilientes. En Boyacá, Colombia, la investigación de Lucco (2019) resalta la lucha de las comunidades campesinas por la seguridad y soberanía alimentaria en un contexto de desigualdad y hambre en LATAM.

En Tierradentro, Colombia, en el Resguardo de Yaquivá se han utilizado saberes tradicionales para diseñar estrategias sustentables, integrando la naturaleza, la cultura y la educación en un Plan de Vida comunitario (Franco, 2021), fortaleciendo la identidad y autonomía de la comunidad, y subrayando la importancia de la inclusión social y la participación comunitaria en la planificación desde un marco jurídico propio (Martínez, 2022).

El mapeo participativo ha sido clave en la lucha por los derechos territoriales y los recursos naturales de las comunidades indígenas y afrodescendientes en LATAM, facilitando la representación espacial y la gestión de recursos, y se ha discutido en foros internacionales como un medio de resistencia y recuperación de prácticas culturales con un enfoque de SA (Hale y Barry, 2013).

El liderazgo de las mujeres ha sido vital en estos procesos. El estudio de Cerna y cols. (2022) sobre el "Buen Vivir" en Paraguay resalta el papel de las mujeres como agentes de cambio en la mitigación del cambio climático, promoviendo la PS desde la cosmovisión Guaraní. La experiencia sobre el fortalecimiento de las organizaciones campesinas de la localidad 20 de Sumapaz, describe la importancia del diálogo de saberes en los procesos de sustentabilidad ambiental, a través de la colaboración efectiva entre las instituciones y comunidades locales, generando una comprensión equilibrada y el fortalecimiento de los conocimientos tradicionales en el éxito de las prácticas sustentables mediado por los proyectos organizados y centrados en los aspectos técnicos y económicos para construir las relaciones de confianza y cooperación en pro de desarrollar una resistencia comunitaria sólida frente a los retos y desafíos ambientales (Bayona y Pachón, 2014).

Estas investigaciones destacan la importancia de las comunidades en la promoción de la SA, inte-

grando los conocimientos tradicionales y los enfoques contemporáneos para desarrollar las estrategias resilientes y adaptativas ante los desafíos actuales.

6.6 Prácticas sustentables y diálogo de saberes

El diálogo de saberes permite articular la diversidad cognitiva y cultural con las categorías de análisis presentes en el estudio, destacando el papel de las comunidades como portadoras de saberes que promueven una relación armónica con la naturaleza y otras formas de vida. Este arraigo y resistencia se manifiestan en su lucha por la defensa de sus territorios, contribuyendo a lo que algunos investigadores han descrito como una "reconstrucción radical del ser, del poder y del saber" (Semanate y Alfonso, 2024).

Otros de los estudios destacados son los de Sánchez-Zárate (2016) y Vergara (2020), donde se menciona cómo la etnoeducación fomenta el desarrollo sustentable en comunidades indígenas y rurales a través del etnoturismo y el manejo sociocultural de agroecosistemas. El último mencionado se enfoca en el manejo sociocultural con base en saberes tradicionales y su efecto en el suelo de agroecosistemas de Guacarí, Valle del Cauca, en Colombia, proporcionando una percepción que corresponde a dar alternativas a las problemáticas como la degradación edáfica, a partir del saber campesino, la caracterización de agroecosistemas y otros procesos.

6.7 SA en el marco de los conflictos ambientales

Este análisis ha revelado información significativa sobre los desafíos que enfrentan las comunidades en relación con la dimensión ambiental, destacando su papel en la articulación de la SA. Los conceptos clave incluyen la gestión de recursos naturales, la mitigación de impactos negativos como el extractivismo (Lehnert y Carrasco, 2020), y la preservación de la diversidad biológica y la calidad de vida en comunidades campesinas, indígenas y locales.

El trabajo de Rodríguez-Enciso (2020) examina la conflictividad ambiental desde la ecología política, centrando su atención en la armonización de

los objetivos de conservación en los territorios campesinos del Parque Nacional Natural de Tinigua, en Venezuela. Este estudio propone la inclusión de experiencias de manejo comunitario del bosque, el reconocimiento de los derechos de tenencia y la implementación de los sistemas de gobernanza forestal, subrayando su importancia para conciliar la conservación con el bienestar de las comunidades campesinas.

Adicionalmente, se han identificado conflictos derivados de la explotación desmesurada de los recursos naturales, la emisión irregular de licencias ambientales, la pobreza, el despojo y el desplazamiento forzado de las comunidades. Estos problemas afectan la estabilidad de las dinámicas ambientales, particularmente en contextos de hidroextractivismo (Luna-Nemecio, 2023).

En este sentido, un ejemplo destacado es el trabajo sobre el río Magdalena (Bocarejo, 2022), que buscó consolidar un escenario para afianzar los enfoques participativos que integren las PS como una respuesta efectiva a los conflictos ambientales, promoviendo un equilibrio entre la conservación y el desarrollo comunitario. En este trabajo se entrelazaron las visiones sobre el análisis de las causas y consecuencias de los cambios en la calidad de agua mediante el fortalecimiento de alternativas sustentables guiadas a la resolución de conflictos de las problemáticas ambientales generadas en este elemento hídrico de importancia ambiental.

6.8 Prácticas sustentables y estudios sobre diversidad biológica

En el ámbito de las PS y la diversidad biológica, se destacan trabajos que han buscado armonizar las actividades humanas con la conservación de la naturaleza. Un ejemplo relevante es la creación de estrategias de conservación para defender los ecosistemas de páramo en la cuenca alta del río Bogotá, Colombia, que han enfrentado significativos conflictos socioambientales (Bernal, 2017). La diversidad biológica, esencial para la salud de los ecosistemas y el bienestar humano, se entrelaza con la etnobotánica, un saber tradicional que vincula el diálogo de saberes con la conservación biológica y cultural, como demuestran el trabajo de Farfán y Valderrama (2023) y Pachón-Barbosa y cols. (2021).

La relación entre la PS y la diversidad biológica se refleja en las actividades como la agroecología y el diálogo de saberes. Un ejemplo es la adaptación de lineamientos para la conservación del Roble (*Quercus humboldtii*) en el corredor de conservación Guantivá-La Rusia-Iguaque, integrando visiones y prácticas locales con criterios jurídicos, políticos e institucionales (Avella y cols., 2013).

Por otro lado, se han encontrado trabajos que se articulan en diversas categorías, incidiendo en procesos de conservación de la diversidad biológica, sustentabilidad ambiental y economía comunitaria, como es el caso de la disponibilidad de las raíces adventicias de tres especies silvestres cosechadas para la elaboración de las artesanías, en el municipio de Santa Elena, en Antioquia, Colombia (Benavides y Hernández, 2015), generando un marco desde los estudios de la diversidad biológica para conocer la demanda de estas raíces y su uso sustentable en la creación y transformación de materia prima para la elaboración de utensilios con un carácter económico.

Estos estudios, centrados en la participación comunitaria y la creación de PS, son clave para avanzar en la aplicación efectiva de la SA, adaptándose a contextos específicos y desafíos actuales.

6.9 Posibles sesgos y limitaciones en el estudio

En este estudio de revisión sistemática, el poder reconocer las limitaciones y sesgos permite cuestionar y reafirmar desde dónde y para qué se están construyendo estos análisis, para evitar las visiones reduccionistas, fragmentadas o distantes de las realidades en torno a la Sustentabilidad Ambiental y las Prácticas Sustentables en América Latina. El presente estudio, aunque fundamentado en una revisión sistemática rigurosa, no está exento de limitaciones que pueden incidir en la interpretación de sus hallazgos. A continuación, se mencionan algunos sesgos y restricciones metodológicas que podrían influir en el alcance de los resultados:

La restricción en la cobertura de fuentes, aunque cabe destacar que la selección de los artículos se realizó en las bases de datos de acceso abierto como Google Scholar, Redalyc, SciELO, Dialnet y otras, con la búsqueda de palabras clave como sustentabi-

lidad ambiental y prácticas sustentables en América Latina. Sin embargo, las bases de datos específicas implican un sesgo de acceso a la producción científica. Esto excluye las investigaciones indexadas en bases con mayor impacto internacional, como Scopus o Web of Science, limitando el diálogo con estudios de referencia internacional. Por otro lado, la selección de fuentes de acceso abierto puede generar un sesgo que excluya las investigaciones de alto impacto publicadas en revistas de acceso restringido. Esto puede generar una limitación en el acceso a estudios con una revisión por pares más rigurosa, afectando la representatividad del análisis.

7 Conclusiones

El análisis cualitativo realizado destaca que las PS en LATAM han avanzado significativamente, adaptándose a las características culturales, sociales y naturales de la región. Este proceso de evolución ha permitido que estas prácticas se consoliden como un mecanismo para alcanzar un desarrollo comunitario que respete la equidad social y mantenga una relación armónica con el entorno natural. Los resultados muestran cómo las diversas comunidades han adoptado las PS, desde las campesinas hasta las indígenas, integrando enfoques que promueven la conservación de la biodiversidad, de sus culturas y de los modos de vida tradicionales.

El diálogo de saberes se presenta como un elemento esencial en la articulación de la SA, permitiendo la interacción entre los conocimientos ancestrales y científicos. Esta convergencia de saberes ha demostrado ser eficaz en la gestión de recursos y en la conservación de la diversidad biológica, especialmente en áreas donde las comunidades locales tienen un rol protagónico, reforzando la identidad cultural de las comunidades, otorgando herramientas para enfrentar y adaptarse a los desafíos ambientales contemporáneos, y fortaleciendo su resiliencia. En este sentido, este proceso complementa los adelantos investigativos en LATAM para generar espacios de participación en las comunidades campesinas, indígenas y urbanas que contribuyan activamente a la construcción de estrategias de sustentabilidad ambiental, en el marco comunitario, político, educativo, económico y social.

Los estudios investigativos centran su mirada en las comunidades campesinas, indígenas y locales, destacando el papel fundamental de estos grupos en la implementación y preservación de las prácticas sustentables. Este criterio representa aproximadamente el 40% de los artículos analizados. Este hallazgo es fundamental en el estudio, debido a que se evidencia la capacidad de resistencia de las comunidades locales, campesinas e indígenas frente a los desafíos ecológicos, sociales y económicos, para generar resistencias a las dinámicas neocoloniales del capital, donde la sustentabilidad ambiental no se reduce a una gestión de recursos o aplicación de tecnologías, sino que entran en convergencia los aspectos políticos de autonomía y re-existencia desarrollados por las comunidades de América Latina.

La resistencia de las comunidades se manifiesta tanto en la preservación de sus prácticas tradicionales como en su habilidad para adaptarse y prosperar en los contextos adversos. Un ejemplo evidente es la lucha constante por sus territorios en la búsqueda de alternativas para suplir las necesidades básicas, como la agroecología para la soberanía y seguridad alimentaria, y la importancia de apoyar a estas comunidades en la conservación de PS, reconociendo su rol en la promoción de alternativas de desarrollo justas y equitativas.

La incorporación de PS en los procesos educativos formales emerge como una estrategia vital para formar ciudadanos conscientes y comprometidos con su entorno. A través de la integración de las tecnologías de la información y la comunicación, y la participación en proyectos comunitarios, las instituciones educativas están transformando la manera en que los estudiantes interactúan con su entorno, siendo fundamental para preparar a las nuevas generaciones para enfrentar los desafíos ambientales desde una perspectiva local, práctica y transformadora.

Se enfatiza la importancia de desarrollar políticas públicas que no solo faciliten la implementación de PS, sino que también respeten y valoren la diversidad cultural y ecológica de la región. Este enfoque integral es clave para avanzar hacia un desarrollo sustentable que beneficie tanto a las comunidades locales como al ambiente en su conjunto.

El análisis cuantitativo de los artículos permite identificar los patrones y las tendencias significativas en la producción académica y científica sobre las PS y SA en América Latina durante el periodo 2010 a 2024, donde se observa un incremento significativo en las publicaciones en los años 2016, 2020, 2021 y 2022, lo que sugiere un interés sobre los aspectos propios que movilizan las nuevas tendencias de la SA y PS. Ahora bien, cabe resaltar países como Colombia y México, donde se concentran el mayor número de investigaciones, lo que permite asumir que la investigación y las líneas de investigación en estas áreas se encuentran en un constante auge, reconociendo las realidades y alternativas de los países. En contraste, países como Perú, Cuba y Uruguay registran una menor producción, lo que evidencia la necesidad de fomentar investigaciones en estos contextos para fortalecer el enfoque regional y reducir las brechas en el acceso y la generación del conocimiento.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Programa de Jóvenes Investigadores de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, y al Grupo de Investigación WAIRA Ambiente, Comunidad y Desarrollo, donde el proyecto se ejecutó en el marco del Semillero de Investigación FIBA-WA Educación y Gestión Ambiental.

Contribuciones de los autores

M.C.C.R.: Conceptualización, Curación de datos, Análisis formal, Investigación, Metodología, Supervisión, Validación, Visualización, Escritura-borrador original, Escritura-revisión y edición. **L.P.A.C.:** Conceptualización, Análisis formal, Investigación, Metodología, Escritura-borrador original, Escritura-revisión y edición. **D.A.V.:** Conceptualización, Curación de datos, Análisis formal, Investigación, Metodología, Supervisión, Validación, Visualización, Escritura-borrador original, Escritura-revisión y edición. **N.A.P.B.:** Conceptualización, Investigación, Administración del proyecto, Supervisión, Validación, Visualización, Escritura-borrador original, Escritura-revisión y edición.

Referencias

- Auer, A., Mikkelsen, C., y Maceira, N. (2022). Territoriality, ecosystem services and sustainable practices of farmers in the southeast of Buenos Aires, Argentina. *Ager, Centro de estudios sobre la despo-lación y desarrollo de áreas rurales*, 35, 7–37. Online: <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/205366>
- Avella, M., León, N., y Rangel, O. (2013). Lineamientos para la conservación y uso sostenible de los bosques de roble (*Quercus Humboldtii* h.b.k.) del sector central del corredor de conservación Guantivá-La Rusia-Iguaque (Departamento de Santander y Boyacá). En N. León (Ed.), *Desarrollo y ambiente: Contribuciones teóricas y metodológicas* (pp. 115–136). Universidad Nacional de Colombia. Online: <https://h7.cl/1oi9x>
- Barreiro Zamorano, S. M., Pérez Avilés, R., Alcántara Flores, J. L., Azuara García, G., Ortiz Espejel, B., y Mora Ramírez, M. (2021). Patrimonio bio-cultural como alternativa sustentable en el Parque Nacional Malintzin, Tlaxcala, México. *RD-ICUAP*, 7(20), 156–173. Online: <https://doi.org/10.32399/icuap.rdic.2448-5829.2021.20.606>
- Bayona, N., y Pachón, F. (2014). Aspectos relevantes en el fortalecimiento de organizaciones campesinas de la localidad 20 de Sumapaz. En F. Pachón y J. Molina (Eds.), *Investigando y actuando en territorios rurales* (pp. 35–52). Editorial Universidad Nacional de Colombia. Online: <https://h7.cl/1jFfo>
- Benavides, A., y Hernández, A. (2015). Disponibilidad de raíces adventicias de tres especies silvestres cosechadas para la elaboración de artesanías en Santa Elena, Antioquia (Colombia). *Caldasia*, 37(2). Online: <https://doi.org/10.15446/caldasia.v37n2.53870>
- Bernal, I. (2017). *Conflictos socioambientales en el páramo de Guacheneque y estrategias de conservación para el ordenamiento ambiental regional* (Tesis de Master, Universidad Nacional de Colombia). Online: <https://h7.cl/1oi9P>
- Bernaschina, D. (2023). El arte ecológico como herramienta para la educación ambiental y la adaptación al cambio climático: Reflexiones y estrategias educativas. *Educación Ambiental y Sostenibilidad*, 5(2). Online: <https://h7.cl/1oi9I>

- Bocarejo, D. (2022). Un río infraestructurado: la gestión comunitaria entre el cemento y los movimientos del agua. *Revista Colombiana de Antropología*, 58(2), 51–76. Online: <https://doi.org/10.22380/2539472X.2137>
- Calvo, V. (2019). *Ambiente y territorio en el Magdalena Medio. prácticas y procesos ambientales de la Asociación Campesina del Valle del Río Cimitarra que aportan a la sustentabilidad territorial de la Zona de Reserva Campesina* (Tesis de Master, Universidad Nacional de Colombia). Online: <https://h7.cl/1oi9T>
- Camacho, C., Sánchez, A., Saldaña, M., y Carcaño, E. (2022). Soberanía alimentaria y agroecología: Contribuciones desde y para la economía ecológica radical. *Revibec: revista iberoamericana de economía ecológica*, 35(3), 39–56. Online: <https://n9.cl/hr18s>
- Carapia, A. (2022). *Reactivando conocimientos bioculturales a través de prácticas sustentables: una intervención de educación ambiental en el nivel medio superior* (Tesis de Master, Universidad Pedagógica Nacional, Ciudad de México). Online: <https://h7.cl/1oi9Y>
- Cardona, E., y Sierra, T. (2023). *Integración de la educación ambiental en las prácticas campesinas en el municipio de girardota antioquia* (Tesis de especialista, Universidad los Libertadores). Online: <https://n9.cl/t0oxzw>
- Carnicer, S., Sotelo, C. E., Pérez, G. L., Ballatore, B. M., y Castelán, M. E. (2020). Prácticas sustentables de mejoramiento de suelo en sistemas hortícolas en el marco de la extensión universitaria. *Agrotecnia*(30), 66–73. Online: <https://doi.org/10.30972/agr.0304658>
- Carrillo, R. (2011). *La vida de los cazadores recolectores*. Anatomía de la historia. Online: <https://h7.cl/1jffFO>
- Castillo, M., Díaz, R., Valderrama, D., De Oliveira, A., y Pachón-Barbosa, N. A. (2023). Los mercados verdes: pretexto para la educación ambiental comunitaria en Colombia. *Revista de Educação, Ciência e Tecnologia do IFG*, 8(1), 8–30. Online: <https://h7.cl/1oiA6>
- Cerna, S., Carrizosa, A., y Rodríguez, M. (2022). Ñande reko o experiencias del “buen vivir” en las organizaciones rurales femeninas, indígenas y de jóvenes. En *Ambiente, cambio climático y buen vivir en américa latina y el caribe* (pp. 521–580). Online: <https://doi.org/10.2307/j.ctv2v88ckd.12>
- Chaga, F. (2012). *Innovaciones campesinas y la búsqueda por autonomía y sustentabilidad: El caso del territorio de Carnaubais, provincia de Piauí, Brasil* (Tesis Doctoral, Universidad de Córdoba, España). Online: <https://h7.cl/1jffV>
- Chaparro, A. (2017). *Sostenibilidad de la agricultura campesina. cómo evaluarla y promoverla* (2.ª ed.). Ediciones de la U.
- Coarasa, A., y Pequeño, D. (2006). El “manifiesto por la vida”: una perspectiva filosófica. *Theomai*(13). Online: <https://h7.cl/1jffF->
- Cortés, H. (2018). *Estructuración de la sustentabilidad en la facultad de ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia* (Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Colombia). Online: <https://h7.cl/1oiAm>
- Cruz, E. (2020). La educación transformadora en el pensamiento de Paulo Freire. *Educere*, 24(78), 197–206. Online: <https://h7.cl/1jffG9>
- Daga, D. Y., Sequeira, N. D., y Vásquez, P. (2022). Evaluación de la sustentabilidad ambiental de sistemas hortícolas del periurbano de Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina. *Acta Agronómica*, 71(3), 221–229. Online: <https://doi.org/10.15446/acag.v71n3.105815>
- Delgado, F., y Rist, E. (2010). *El desarrollo endógeno sustentable como interfaz para implementar el vivir bien en la gestión pública boliviana*. La Paz, Bolivia: Agruco-Captured. Online: <https://boris.unibe.ch/69285/>
- Díaz, C., Castiblanco, C., y Pinzón, C. (2016). *Los mercados verdes como estrategia de internacionalización de las PYMES: Acercamientos a una reflexión de las implicaciones para la empresa* (Inf. Téc.). Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Online: <https://h7.cl/1oiAr>
- Eschenhagen, M. (2015). El fracaso del desarrollo sostenible: La necesidad de buscar alternativas al desarrollo, algunas entradas. En A. González, E. Aguiar, L. Carmona, y L. Alves de Albuquerque (Eds.), *Espaço, políticas públicas e território: Reflexões a partir da américa do sul* (pp. 75–90). Online: <https://h7.cl/1oiAy>

- Farfán, L. N. F., y Valderrama, D. A. (2023). Plantas medicinales comercializadas en la plaza de mercado del sur en Tunja, Boyacá. *Revista ECIPerú*, 20(1), 5–11. Online: <https://doi.org/10.33017/RevECIPeru2023.0001/>
- Fauth, G., y Antunes, L. (2016). El compromiso de paisaje en las ciudades: Desafíos y estrategias para la resistencia y la sostenibilidad para garantizar la perspectiva de los derechos. *Conselho Nacional de Pesquisa e Pós-Graduação em Direito*, 1(12), 79–92.
- Flórez, G. (2012). La educación ambiental: una apuesta hacia la integración escuela-comunidad. *Praxis & Saber*, 79–101. Online: <https://n9.cl/e6z9e>
- Franco, M. (2021). *Aportes desde la agroecología al análisis de prácticas tradicionales en el resguardo indígena de yaquiva* (Trabajo doctoral, Universidad Nacional de Colombia). Online: <https://n9.cl/0yx5g>
- Gudynas, E. (2014). *Derechos de la naturaleza, ética biocéntrica y políticas ambientales*. Red Peruana por una Globalización con Equidad.
- Gómez, A. (2014). *Importancia de replicar buenas prácticas de sustentabilidad ambiental en empresas de consumo masivo (alimentos), en Colombia* (Tesis de Master, Universidad Militar Nueva Granada). Online: <https://h7.cl/1jfGk>
- Hale, C., y Barry, D. (2013). Territorialidad, mapeo participativo y política sobre los recursos naturales: la experiencia de América Latina. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 22(2), 193–209.
- Hernández, R., y Mendoza, C. (2018). *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. McGraw Hill Education. Online: <https://h7.cl/1oiaE>
- Leff, E. (2004). *Racionalidad ambiental, la reapropiación social de la naturaleza*. Siglo XXI Editores.
- Leff, E. (2009). *Pensamiento ambiental latinoamericano: Patrimonio de un saber para la sustentabilidad*. Online: <https://h7.cl/1oiaJ>
- Leff, E., Elizalde, R., y Elizalde, A. (2019). La apuesta por la vida. imaginación sociológica e imaginarios sociales en territorios ambientales del sur. *Polis Revista Latinoamericana*, 54, 185–189. Online: <https://n9.cl/f8pqu>
- Lehnert, M., y Carrasco, N. (2020). Del vivir bien y del desarrollo sustentable, extractivismos y construcción de alternativas al desarrollo en Bolivia y Chile. *Diálogo andino*(63), 189–204. Online: <https://doi.org/10.4067/S0719-26812020000300189>
- Leiva-Sajuria, C. (2014). La agricultura y la ciencia. *Idesia (Arica)*, 32(3), 03–05. Online: <https://doi.org/10.4067/S0718-34292014000300001>
- Lucco, M. (2019). *Saberes ancestrales y autonomía alimentaria en fincas de agricultura familiar campesina en tres municipios de Boyacá* (Tesis de Master, Universidad Nacional de Colombia). Online: <https://n9.cl/t60js>
- Luna-Nemecio, J. (2023). Huella territorial del hidroextractivismo en México: análisis territorial y genético estructural sobre el conflicto socioambiental por el Proyecto Integral Morelos. *Territorios*(49). Online: <https://h7.cl/1jfGy>
- Martínez, L. (2022). Reseña: El papel de los conocimientos locales en el paradigma. Número especial 92 *Revista Nueva Antropología: Revista de Ciencias Sociales. Ensayos de Economía*, 32(60), 182–187. Online: <https://doi.org/10.15446/ede.v32n60.102624>
- Marín, M. I. R. (2011). Modelo de sistema de gestión ambiental para formar universidades ambientalmente sostenibles en Colombia. *Gestión y ambiente*, 14(1), 151–161. Online: <https://h7.cl/1oiaU>
- Maya, A. (2015). *La fragilidad ambiental de la cultura. historia y medio ambiente* (2.ª ed.). Universidad Nacional de Colombia. Online: <https://h7.cl/1jfGG>
- Mejía-Cáceres, M., Freire, L., y García, E. (2018). *Educación en ciencias y educación ambiental en la formación de profesores* (1.ª ed.). Programa Editorial Universidad del Valle.
- Muñoz, T. (2022). *Agroecología, salud y territorio. e xperiencias en México y Colombia* (Tesis Doctoral, Universidad de Córdoba). Online: <https://h7.cl/1oib6>
- Noguera de Echeverri, A. (2011). *Homenaje a Carlos Augusto Ángel Maya: La aventura estética del pensamiento ambiental*. Instituto de Estudios Ambientales IDEA. Online: <https://h7.cl/1oib8>

- Pacheco, J., y Ortiz, (2022). Sustainability of agro-ecological farms in toacaso, cotopaxi-ecuador. *Peruvian Journal of Agronomy*, 6(1), 103–113. Online: <https://doi.org/10.21704/pja.v6i1.1766>
- Pachón-Barbosa, N. A., Cadena Reyes, M. L., Castillo Ruge, M. C., y Rodríguez Vargas, L. K. (2021). El invernadero como escenario de educación ambiental no formal para la enseñanza de la etnobotánica. *Bio-grafía*. Online: <https://h7.cl/1oibe>
- Paiva, A. (2004). La educación liberadora de Paulo Freire y el desarrollo del pensamiento. En *Iii simposio "el formador de formadores en los albores del siglo xxi"*. Valencia. Online: <https://h7.cl/1jfGU>
- Payarés-Comas, B., y Garnica-Morales, L. (2010). Cultura y economía en el desarrollo social humano. *Humanidades Médicas*, 10(3), 1–16. Online: <https://h7.cl/1oibk>
- Porras, J., y Pérez, M. (2018). Identidad ambiental: Múltiples perspectivas. *Revista Científica*. Online: <https://h7.cl/1jfH8>
- Rincón-Martínez, J. (2012). *Criterios de diseño bioclimático para la integración y sustentabilidad de instalaciones en mar abierto: caso de estudio, Parque Nacional Isla Contoy, Q. Roo* (Tesis de Master, Universidad Autónoma Metropolitana). Online: <https://h7.cl/1jfHc>
- Rodríguez-Enciso, L. (2020). *Vivencias campesinas y conflictos ambientales en el Parque Nacional Natural Tinigua* (Tesis de Master, Universidad Nacional de Colombia). Online: <https://h7.cl/1jfHf>
- Romero, A., y Vázquez, L. (2012). *Patrimonio biocultural, saberes y derechos de los pueblos originarios*. Consejo Latinoamericano de Ciencias Sociales.
- Ruiz, E. (2021). Formación de ciudadanos ambientales mediante un curso sobre la sostenibilidad del agua utilizando TIC. *Revista de la Educación Ambiental y Sostenibilidad*, 3(1). Online: <https://h7.cl/1oibx>
- Sanchís, M. (2013). Francisco Comín Comín. Historia económica mundial. De los orígenes a la actualidad. *Investigaciones de Historia Económica*. Online: <https://doi.org/10.1016/j.ihe.2013.02.002>
- Sandoval-Escobar, M. (2012). Comportamiento sustentable y educación ambiental: una visión desde las prácticas culturales. *Revista Latinoamericana de Psicología*, 44(1), 181–196. Online: <https://h7.cl/1oibG>
- Sarmiento, H. J., y Larrinaga, C. (2021). De otro mundo y en otra lengua. informes de sostenibilidad sin conflictos ambientales ni pueblos originarios. *Innovar*, 31(82), 87–106. Online: <https://doi.org/10.15446/innovar.v31n82.98418>
- Semanate, H., y Alfonso, C. (2024). La etnoeducación como instrumento para la promoción del desarrollo sustentable. un análisis desde la ciencia. *La Granja, revista de Ciencias de la Vida*, 39(1), 11–26. Online: <https://doi.org/10.17163/lgr.n39.2024.01>
- Serrano, M. (2007). Evolución e historia en el desarrollo de la comunicación humana. En *Teoría de la comunicación. la comunicación, la vida y la sociedad* (pp. 161–164). Madrid: McGraw-Hill Interamericana de España. Online: <https://h7.cl/1oibJ>
- Severino-González, P., Acuña-Moraga, O., Astete-Tapia, K., y Medel-Maturana, J. (2021). Responsabilidad social y consumo sustentable: el caso de estudiantes de formación superior de Talca (Chile). *Información tecnológica*, 32(1), 143–150. Online: <https://doi.org/10.4067/S0718-07642021000100143>
- Slutzky, S. (2012). *Rescatando la historia perdida. el pensamiento ambiental latinoamericano a la luz de las contradicciones actuales del desarrollo* (Inf. Téc.). CLACSO. Online: <https://h7.cl/1jfHw>
- Sánchez-Zárate, P. U. (2016). Diseño de servicios: una estrategia para el etnoturismo. *Gestión y Ambiente*, 19(2), 289–301. Online: <https://doi.org/10.15446/ga.v19n2.54514>
- Tuay Sigua, R. N., Porras Contreras, Y. A., y Pérez Mesa, M. R. (2016). Representaciones de ambiente y sustentabilidad de docentes en formación inicial de la Universidad Pedagógica Nacional y en ejercicio de escuelas normales superiores. *Indagatio Didactica*, 8(1), 610–621. Online: <https://doi.org/10.34624/id.v8i1.3394>
- Valdivieso, M. (2009). Globalización, género y patrón de poder. En *Género y globalización* (pp. 27–52). Online: <https://h7.cl/1oibP>

- Valenzuela-Van Treek, E., Ostoic-Marroquín, Z., y González-González, J. (2021). Manfred Max Neef y la revolución ambientalista para América Latina, 1932-2019 (in memoriam). *Iberoamerican Journal of Development Studies*, 10(2), 230–248. Online: https://doi.org/10.26754/ojs_ried/ijds.640
- Vergara, A. (2020). *Manejo sociocultural con base en saberes tradicionales y su efecto en el suelo de agroecosistemas de Guacasrí, Valle del Cauca* (Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Colombia). Online: <https://n9.cl/gmzrd>
- Villalva, M., y Inga, C. (2020). Saberes ancestrales gastronómicos y turismo cultural de la ciudad de Riobamba, provincia de Chimborazo. *Cumbres*, 6(2), 65–82. Online: <https://h7.cl/1oibW>



EL PAPEL DEL NEAZDP EN LA MOVILIDAD SOCIAL DE LA POBREZA EN EL ESTADO DE YOBE, NIGERIA

THE ROLE OF NEAZDP ON SOCIAL MOBILITY OF POVERTY IN YOBE STATE OF NIGERIA

Mohammed Sanusi Sadiq * e Isiyaku Jawa Grema

Department of Agricultural Economics and Agribusiness, FUID, P.M.B. 7156, Dutse, Nigeria. [https://ror.org/0278jft56]

*Autor para correspondencia: sadiqsanusi30@gmail.com

Manuscrito recibido el 19 de septiembre de 2024. Aceptado, tras revisión el 28 de mayo de 2025. Publicado el 1 de marzo de 2026.

Resumen

El estado de Yobe, en Nigeria, caracterizado por diferentes desafíos socioeconómicos como la variabilidad climática y la infraestructura deficiente, ofrece un contexto relevante para evaluar las estrategias de reducción de la pobreza. Este estudio analiza la efectividad del Programa de Desarrollo de la Zona Árida del Noreste (NEAZDP) como estrategia de mitigación de la pobreza, utilizando datos de una encuesta transversal realizada en 2023 a 322 hogares, seleccionados mediante una técnica de muestreo en varias etapas. La recolección de datos se efectuó mediante cuestionarios estructurados y entrevistas programadas. El análisis empleó tanto el índice de pobreza Foster-Greer-Thorbecke (FGT) como el índice de pobreza multidimensional Alkire-Foster (MPI) para medir la pobreza. Los resultados revelan que el NEAZDP tuvo un impacto significativo en la reducción de la pobreza tanto unidimensional como multidimensional entre los participantes. La proporción de beneficiarios por debajo de la línea de pobreza disminuyó sustancialmente durante la ejecución del programa, aunque se observó un ligero incremento hacia su finalización. Además, los niveles de pobreza multidimensional entre los beneficiarios del NEAZDP fueron significativamente menores en comparación con los grupos de desbordamiento y de control, evidenciando mejoras en el acceso a la educación, la atención médica y las oportunidades de generación de ingresos. A pesar de estos avances, el estudio identificó desafíos en aspectos como el nivel de vida, el empoderamiento y la sostenibilidad ambiental. En conclusión, el NEAZDP ha logrado avances importantes en la mejora de las condiciones socioeconómicas y en la promoción de la movilidad social en el estado de Yobe. Sin embargo, para mantener su impacto, hay que implementar intervenciones continuas y específicas, así como una mejor integración de las políticas públicas. El fortalecimiento de estos aspectos puede garantizar el éxito a largo plazo de los esfuerzos de mitigación de la pobreza y fomentar un desarrollo inclusivo en toda la región.

Palabras clave: Desarrollo, intervención, alivio de la pobreza, sostenibilidad, Nigeria.

Abstract

Yobe State in Nigeria, marked by socio-economic challenges such as climate variability and poor infrastructure, provides a compelling context for assessing poverty reduction strategies. This study evaluates the effectiveness of the Northeast Arid Zone Development Program (NEAZDP) as a poverty alleviation strategy using 2023 cross-sectional household survey data from 322 households selected through a multi-stage sampling technique. Data collection was carried out using a well-structured questionnaire coupled with interview schedules. The analysis employed both the Foster-Greer-Thorbecke (FGT) poverty index and the Alkire-Foster multidimensional poverty index (MPI) to measure poverty. Results reveal that NEAZDP has had a significant impact on reducing both unidimensional and multidimensional poverty among participants. The proportion of beneficiaries below the poverty line decreased substantially during the program, although a slight increase was noted toward the program's conclusion. Furthermore, multidimensional poverty levels among NEAZDP beneficiaries were significantly lower compared to those in spill-over and control groups, indicating improvements in access to education, healthcare, and income-generating opportunities. Despite these successes, the study identified persistent challenges in areas such as standard of living, empowerment, and environmental sustainability. In conclusion, NEAZDP has made notable progress in enhancing socio-economic conditions and social mobility in Yobe State. However, for its impact to be sustained, there is a need for continuous, targeted interventions and better policy integration. Strengthening these areas can help ensure the long-term success of poverty alleviation efforts and promote inclusive development across the region.

Keywords: Development, Intervention, Poverty Alleviation, Sustainability, Nigeria.

Forma sugerida de citar: Sadiq, M.S. y Grema, I.J. (2026). El papel del NEAZDP en la movilidad social de la pobreza en el estado de Yobe, Nigeria. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*. Vol. 43(1):34-66. <https://doi.org/10.17163/lgr.n43.2026.02>.

Orcid IDs:

Mohammed Sanusi Sadiq: <https://orcid.org/0000-0003-4336-5723>

Isiyaku Jawa Grema: <https://orcid.org/0009-0001-3740-424X>

1 Introducción

El estado de Yobe, ubicado en el noreste de Nigeria, continúa profundamente afectado por la pobreza, agravada por su clima árido y semiárido, la limitada infraestructura y los persistentes desafíos socioeconómicos (Gadzama, 2017; Umar, 2024; Madaki y cols., 2024). En respuesta a esta situación, se implementó el Programa de Desarrollo de la Zona Árida del Noreste (NEAZDP, por sus siglas en inglés) con el propósito de promover el empoderamiento económico y el desarrollo sostenible entre las poblaciones rurales vulnerables (Mukhtar y cols., 2017; Galadima y Isa, 2020). Aunque el programa ha realizado importantes inversiones en la agricultura, el emprendimiento y la infraestructura rural, su efectividad en impulsar la movilidad social y la reducción sostenible de la pobreza aún no se ha estudiado ampliamente.

A pesar de las intervenciones del NEAZDP, persisten interrogantes respecto al grado en que este programa ha mejorado los medios de vida, los niveles de ingreso y el acceso a servicios esenciales, así como sobre su capacidad para fomentar la resiliencia económica a largo plazo frente a los continuos desafíos climáticos y de seguridad. El contexto socioeconómico y ambiental único del estado de Yobe—caracterizado por la desertificación, la inseguridad alimentaria y los conflictos—plantea retos de implementación que pueden limitar el impacto del programa en comparación con otras regiones.

El análisis comparativo internacional amplía la discusión. Por ejemplo, el programa Bolsa Familia en Brasil y la Ley Nacional de Garantía de Empleo Rural Mahatma Gandhi (MGNREGA) en India han demostrado cómo los programas integrales de protección social y medios de vida pueden sacar a los hogares de la pobreza mediante transferencias monetarias condicionadas, creación de empleo y acceso a servicios básicos. En Ghana, el programa Livelihood Empowerment Against Poverty (LEAP) refleja un enfoque similar al del NEAZDP al centrarse en grupos vulnerables, pero integrando incentivos más específicos en salud y educación (Schotte, 2023; Woode, 2024). Estos programas internacionales subrayan la importancia del monitoreo, la adaptabilidad y la integración de políticas, factores cruciales para replicar el éxito en los contextos frágiles como el de Nigeria.

Asimismo, diversos estudios en África subsahariana sugieren que la eficacia de los programas de reducción de la pobreza depende del contexto, y su éxito radica en la participación comunitaria, la adaptabilidad ambiental y la gobernanza inclusiva (Ncube y cols., 2024; Wudil y cols., 2022). En este sentido, el estado de Yobe constituye un caso singular para evaluar el impacto de los programas de desarrollo rural en entornos ecológicamente frágiles y propensos al conflicto.

Por tanto, este estudio busca llenar vacíos empíricos evaluando el papel del NEAZDP en la mejora de la movilidad social y la reducción de la pobreza, tanto unidimensional como multidimensional, entre sus beneficiarios en el estado de Yobe. En particular, se evalúa el impacto del programa en comparación con grupos no beneficiarios (de desbordamiento y de control), utilizando métricas cuantitativas y evidencia cualitativa. Los resultados de esta investigación aspiran a informar políticas públicas basadas en evidencia, mejorar la efectividad del programa y contribuir a las estrategias más amplias de desarrollo sostenible e inclusivo en Nigeria y en África subsahariana (Orunbon y Adeleke, 2024; Kabari y Nwogo, 2021; Ogbari y cols., 2024; Kolawole y Samuel, 2024). En síntesis, los objetivos específicos fueron evaluar el papel del NEAZDP en la pobreza unidimensional entre el grupo beneficiario y la pobreza multidimensional de los beneficiarios en comparación con los no beneficiarios.

2 Marco Teórico

El fundamento de este estudio se apoya en teorías consolidadas de la pobreza y el desarrollo, que explican los mecanismos mediante los cuales las intervenciones como el Programa de Desarrollo de la Zona Árida del Noreste (NEAZDP) influyen en la reducción de la pobreza y la movilidad social en contextos frágiles como el del estado de Yobe, Nigeria.

2.1 Enfoque de las Capacidades (Amartya Sen)

El enfoque de las capacidades de Sen redefine la pobreza más allá de la insuficiencia de ingresos, considerándola una privación de capacidades básicas como la educación, la salud y las condiciones de vida

(Sen, 1999). Este marco teórico es crucial para comprender cómo las intervenciones del NEAZDP en la agricultura, educación e infraestructura no solo afectan los ingresos, sino también el bienestar integral. Este enfoque ha sido ampliamente aplicado en los estudios de desarrollo rural en África subsahariana (Mak y cols., 2023).

2.2 Teoría de la Movilidad Social

Basada en los trabajos de Blau y Duncan (1967), esta teoría explica cómo los individuos o los hogares pueden cambiar su posición socioeconómica a lo largo del tiempo. El énfasis del NEAZDP en la adquisición de habilidades, el apoyo al emprendimiento y el acceso a la infraestructura puede favorecer la movilidad vertical de los habitantes rurales previamente marginados (Lembi y Yahaya, 2023).

2.3 Teoría del Crecimiento y la Redistribución

Como destaca Bourguignon (2004), el crecimiento económico por sí solo no es suficiente para combatir la pobreza si no está acompañado por una redistribución equitativa. Esta teoría coincide con los estudios que indican que los componentes redistributivos del NEAZDP—como los insumos agrícolas subsidiados y los esquemas de empoderamiento financiero—desempeñan un papel fundamental en la reducción de la desigualdad rural (Sadiq y Grema, 2024).

2.4 Marco de Pobreza Multidimensional (Alkire y Foster, 2011)

Este modelo enfatiza las privaciones simultáneas en distintos ámbitos—educación, salud y nivel de vida—y respalda el uso del Índice de Pobreza Multidimensional (MPI) para evaluar el NEAZDP. Las aplicaciones empíricas de este enfoque en Nigeria han revelado diferencias que no se han podido identificar por los indicadores basados en los ingresos (Naibbi, 2023; Jellason, 2018).

2.5 Teoría de la Transición Demográfica

Según Notestein (1945), los cambios en la estructura poblacional influyen en los resultados del desarrollo. Los factores como el tamaño de los hogares, la

migración rural-urbana y las cargas de dependencia en el estado de Yobe pueden atenuar el impacto del NEAZDP si las intervenciones no se diseñan considerando estas realidades demográficas (Cinjel y Kefas, 2024).

3 Marco Conceptual

El marco conceptual ilustra las relaciones lógicas entre las intervenciones del NEAZDP y las variables dependientes del estudio: pobreza unidimensional, pobreza multidimensional y movilidad social, y está estructurado en torno a tres ejes principales:

Insumos: Intervenciones del NEAZDP

- Apoyo agrícola (herramientas, semillas, riego).
- Desarrollo de infraestructura (pozos, caminos).
- Capacitación vocacional y adquisición de habilidades.
- Microcréditos y apoyo al emprendimiento.

Variables mediadoras

- Demografía del hogar (tamaño, índice de dependencia, nivel educativo).
- Acceso a los servicios (escuelas, atención médica, mercados).
- Condiciones ambientales (aridez, desplazamiento, inseguridad).

Estas variables influyen en la velocidad y la profundidad de la reducción de la pobreza.

Variables de resultado

- Pobreza unidimensional: medida mediante umbrales de ingreso (índice FGT).
- Pobreza multidimensional: dominios del MPI (educación, salud, nivel de vida).
- Movilidad social: cambios en clase de ingreso, ocupación y nivel educativo a lo largo del tiempo.

Este marco permite un análisis estructurado sobre cómo los programas de desarrollo generan resultados diferenciados en la pobreza según los factores demográficos y estructurales, además de guiar

la aplicación conjunta de las metodologías FGT y Alkire-Foster para evaluar los niveles de pobreza y el impacto del programa.

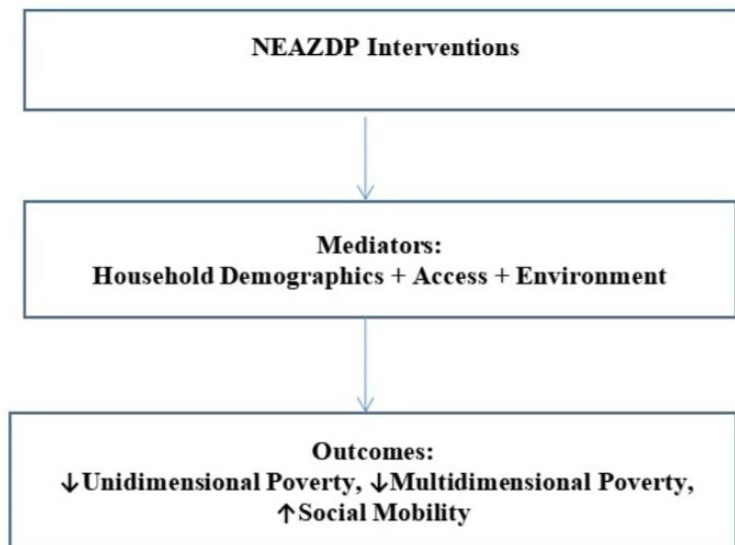


Figura 1. Marco conceptual

4 Revisión Empírica

Esta sección sintetiza la evidencia empírica sobre la efectividad del Programa de Desarrollo de la Zona Árida del Noreste (NEAZDP) en la promoción de la reducción de la pobreza y la movilidad social entre los beneficiarios del estado de Yobe, Nigeria, a partir de estudios recientes y contextualmente relevantes realizados entre 2019 y 2024.

4.1 Reducción de la pobreza y mejora de los medios de vida

Diversos estudios señalan que el NEAZDP ha desempeñado un papel fundamental en la provisión de medios de vida sostenibles para las comunidades rurales del estado de Yobe, mediante la promoción del apoyo agrícola, el suministro de agua y la conservación ambiental (Mukhtar y cols., 2017). El éxito del programa en la mitigación de la degradación del suelo y la desertificación ha contribuido a mejorar la seguridad alimentaria, impactando directamente en la reducción de la pobreza (Danjuma y Daura, 2014).

Un estudio de Mukhtar y cols. (2017) encontró que, si bien las intervenciones del NEAZDP han mejorado el acceso a los servicios básicos en el norte de Yobe, la reducción sostenible de la pobreza sigue siendo un desafío. Los autores sostienen que la limitada financiación gubernamental y las inconsistencias políticas obstaculizan el impacto a largo plazo del programa.

4.2 Movilidad social a través del empoderamiento económico

Lembi y Yahaya (2023) examinaron la relación entre los esfuerzos de desarrollo rural del NEAZDP y la movilidad social ascendente. Su estudio identificó mejoras en la posición ocupacional y en el nivel educativo de los participantes, especialmente entre mujeres y jóvenes, como resultado de las intervenciones en agricultura y emprendimiento. No obstante, reportaron efectos de desbordamiento limitados en los no beneficiarios dentro de las mismas comunidades.

4.3 Dinámicas de pobreza multidimensional

De acuerdo con Naibbi (2023), las disparidades espaciales en el acceso a servicios como agua potable y educación continúan afectando la pobreza multidimensional. Su análisis cartográfico espacial del estado de Yobe reveló que, aunque los beneficiarios del NEAZDP obtuvieron mejores puntuaciones en el Índice de Pobreza Multidimensional (MPI) que los grupos de control, la desigualdad en la infraestructura y la presión demográfica redujeron estos avances en las áreas más remotas de gobierno local.

4.4 Desafíos ambientales e institucionales

Jellason (2018) analizó los desafíos ambientales como la expansión del desierto, la degradación del suelo y la inseguridad alimentaria—factores que socavan el éxito a largo plazo del NEAZDP. El estudio recomendó integrar la gestión ambiental sostenible en el diseño del programa, especialmente para fortalecer la resiliencia agrícola.

4.5 Resultados diferenciados por género y comunidad

Las investigaciones de Cinjel y Kefas (2024) exploraron cómo las normas culturales y de género moldean los resultados del NEAZDP en distintas comunidades. Su investigación en las Áreas de Gobierno Local (LGAs) de Mangu y Potiskum reveló que los hombres dominaban el acceso a los insumos de capital, mientras que las mujeres se beneficiaban principalmente de los componentes de capacitación vocacional, evidenciando un impacto desigual del programa.

4.6 Implementación de políticas y brechas de gobernanza

Wrona y cols. (2023) destacó la débil capacidad institucional y la falta de armonización de datos como los principales obstáculos que afectan la eficiencia del NEAZDP. El estudio subraya la importancia de establecer mecanismos de monitoreo coordinado y participación comunitaria para garantizar la efectividad a largo plazo del programa en la región.

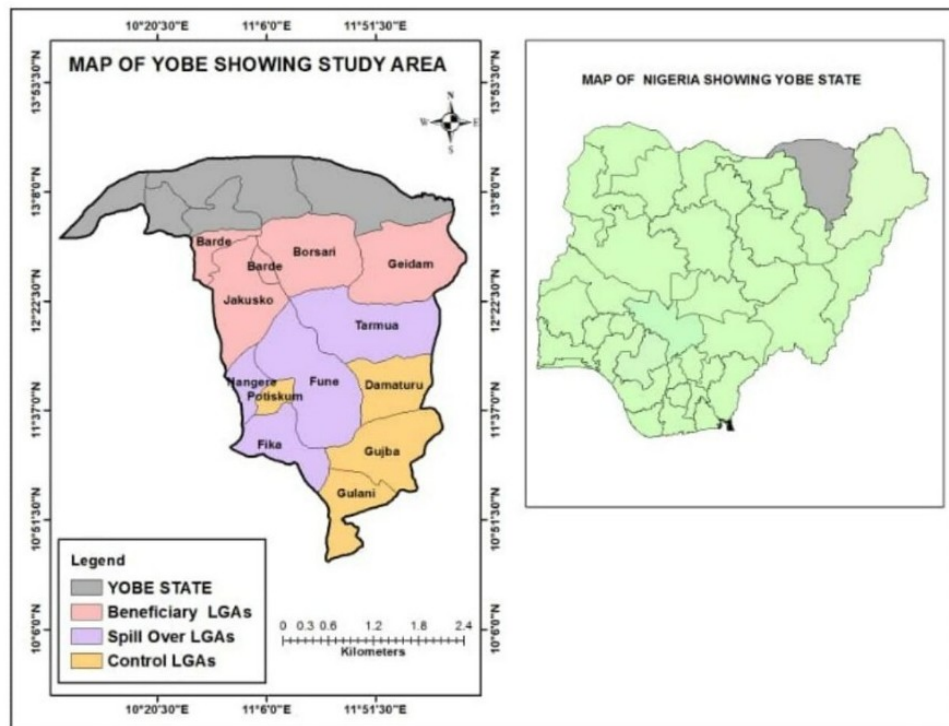


Figura 2. Mapa de la zona de estudio

5 Metodología de la Investigación

El estado de Yobe, situado en el noreste de Nigeria, abarca aproximadamente 45.502 km² y comparte fronteras con la República de Níger y varios estados nigerianos (véase Figura 2). Se encuentra dentro de la zona sudano-saheliana, caracterizada por un relieve plano, con altas temperaturas, frecuentes sequías y riesgos de desertificación (Naibbi, 2023; Jellason, 2018). Agroecológicamente, Yobe es una región semiárida con una estación lluviosa corta y suelos de baja fertilidad. La agricultura—principalmente de secano—se centra en cultivos como mijo y caupí, junto con la cría de ganado. Sin embargo, la productividad agrícola sigue siendo baja debido a las limitaciones ambientales (Gadzama, 2017).

Económicamente, el estado mantiene un carácter predominantemente agrario, con más del 70% de sus habitantes dedicados a la agricultura de subsistencia. Los problemas como la inseguridad, la infraestructura deficiente y el acceso limitado a los mercados han intensificado la pobreza. En consecuencia, la región presenta altas tasas de pobreza tanto unidimensional como multidimensional (Mak y cols., 2023).

El Programa de Desarrollo de la Zona Árida del Noreste (NEAZDP) opera en la parte norte del estado, abarcando nueve (9) Áreas de Gobierno Local (LGAs): Bade, Jakusko, Bursari, Geidam, Yunusari, Yusufari, Nguru, Karasuwa y Machina. Para este estudio, se empleó una técnica de muestreo por etapas múltiples, seleccionando a los participantes en tres estratos: Grupo tratado (participantes del proyecto), Grupo de desbordamiento (no beneficiarios en comunidades cercanas) y Grupo de control (no beneficiarios en comunidades distantes).

En la primera etapa, se seleccionaron aleatoriamente cuatro LGAs del grupo tratado: Bade, Jakusko, Bursari y Geidam.

En la segunda etapa, se seleccionaron de forma intencional cuatro LGAs para los grupos de desbordamiento y de control, respectivamente:

LGAs de desbordamiento: Tarmuwa, Nangere, Fune y Fika, ubicadas dentro de un radio de 20–50 km de las zonas de intervención.

LGAs de control: Damaturu, Potiskum, Gujba y Gulani, situadas a distancias ≥ 100 km de las áreas de intervención, siguiendo el enfoque adoptado por Sadiq y cols. (2020).

De cada LGA tratada, se identificó un Área de Desarrollo (DA). Posteriormente, se eligieron tres conglomerados al azar por cada DA, obteniendo un total de doce conglomerados. Dentro de ellos, se seleccionaron aleatoriamente dos aldeas, resultando en 40 aldeas distribuidas entre los tres estratos (tratado, desbordamiento y control).

Usando un marco muestral obtenido del NEAZDP y validado mediante un estudio de reconocimiento (véase Tabla 1), se seleccionaron aleatoriamente cinco beneficiarios por cada una de las 24 aldeas tratadas (3 conglomerados \times 4 LGAs \times 2 aldeas), dando un total de 120 encuestados para el grupo tratado.

Para los grupos no beneficiarios (desbordamiento y control), donde no existía un marco muestral finito, el tamaño de muestra se determinó utilizando la fórmula de Bartlett y cols. (2002) para el cálculo del tamaño muestral (Ecuación 1). Se seleccionaron 138 encuestados al azar para cada uno de los grupos de desbordamiento y de control.

En total, el estudio contó con una muestra de 396 encuestados, distribuidos de la siguiente manera: Grupo tratado (120 encuestados), Grupo de desbordamiento (138 encuestados) y Grupo de control (138 encuestados).

Estos grupos constituyen la base para el análisis comparativo del impacto del NEAZDP en la pobreza y la movilidad social (véase Tabla 1).

Además, se recopiló un conjunto de datos transversales durante 2023 utilizando el método de ruta económica simplificada (*easy-route cost approach*). La recolección de datos se realizó por medio de encuestadores capacitados mediante un cuestionario estructurado, complementado con entrevistas semiestructuradas para aumentar la profundidad y confiabilidad de la información.

El objetivo relacionado con la dimensión económica o de ingresos (unidimensional) de la pobreza se abordó utilizando el índice Foster-Greer-

Thorbecke (FGT) (Ecuaciones 2–15), mientras que el objetivo relativo a la dimensión social (multidimensional) se analizó aplicando el Índice de Pobreza Multidimensional de Alkire y Foster (MPI).

Según la fórmula de Bartlett, el tamaño de la muestra de una población desconocida puede obtenerse mediante la siguiente expresión:

$$N_{nb} = \frac{Z^2 \cdot P(1-P)}{e^2} \quad (1)$$

Donde, N_{nb} es el tamaño de la muestra de los no beneficiarios, Z es el estadístico Z al nivel de probabilidad del 5% (1.96), P es la proporción muestral (10%), y e es el margen de error al 5%.

5.1 Modelo empírico

5.1.1 Enfoque económico/de ingresos (unidimensional) de la medición de la pobreza

a. Descomposición del índice FGT según los efectos de crecimiento y redistribución

Datt y Ravallion (1992) descomponen el cambio en el índice FGT entre dos periodos, t_1 y t_2 , en componentes de crecimiento y redistribución, de la siguiente manera (Urban y cols., 2024; Rebechi y Rohde, 2023):

$$P_2 - P_1 = [P(\mu^2, \pi^1) - P(\mu^1, \pi^1)] + [P(\mu^1, \pi^2) - P(\mu^1, \pi^1)] + R \quad /ref = 1 \quad (2)$$

$$P_2 - P_1 = [P(\mu^2, \pi^2) - P(\mu^1, \pi^2)] + [P(\mu^2, \pi^1) - P(\mu^1, \pi^1)] + R \quad /ref = 2 \quad (3)$$

Donde la expresión $P_2 - P_1$ representa la diferencia o variación de la pobreza entre los periodos t_1 y t_2 . El Componente 1 (C1) corresponde al efecto o impacto del crecimiento, mientras que el Componente 2 (C2) refleja el efecto de la redistribución. El término R denota el componente residual y Ref. hace referencia al período de referencia.

$P(\mu^1, \pi^1)$: el índice FGT del primer período.

$P(\mu^2, \pi^2)$: el índice FGT del segundo período.

$P(\mu^2, \pi^1)$: el índice FGT del primer período cuando todos los ingresos y_i^1 del primer período se multiplican por μ^2/μ^1 .

$P(\mu^1, \pi^2)$: el índice FGT del segundo período cuando todos los ingresos y_i^2 del segundo período se multiplican por μ^1/μ^2 .

El valor de Shapley descompone la variación en el índice FGT entre dos periodos, t_1 y t_2 , en los componentes de crecimiento y redistribución, como se expresa en (Aristondo y Onaindia, 2020; Fosu y Gafa, 2022):

$$P_2 - P_1 = C_1 + C_2 \quad (4)$$

$$C_1 = \frac{1}{2} ([P(\mu^2, \pi^1) - P(\mu^1, \pi^1)] + [P(\mu^2, \pi^2) - P(\mu^1, \pi^2)]) \quad (5)$$

$$C_2 = \frac{1}{2} ([P(\mu^1, \pi^2) - P(\mu^1, \pi^1)] + [P(\mu^2, \pi^2) - P(\mu^2, \pi^1)]) \quad (6)$$

b. Curvas pro-pobres

Las curvas pro-pobres pueden construirse mediante el enfoque primal o dual (Rehman y cols., 2024; Fatima y cols., 2024). El primero se basa en los niveles de ingreso; el segundo, en percentiles.

El cambio en la distribución del estado 1 al estado 2 es absolutamente pro-pobre de orden s , bajo condiciones estándar, si:

$$\Delta(z, s) = (P_2(z + cons, \alpha = s - 1)) < 0 \quad \forall z \in [0, z^+] \quad (7)$$

El cambio en la distribución del estado 1 al estado 2 es de orden s relativamente pro-pobre si:

$$\Delta(z, s) = \left(P_2 \left(z \frac{\mu_2}{\mu_1}, \alpha = s - 1 \right) - P_1(z, \alpha = s - 1) \right) < 0 \quad (8)$$

$\forall z \in [0, z^+]$

5.2 Impacto de los cambios demográficos

Esta aplicación calcula el impacto de un cambio (en un porcentaje dado) en la proporción de un grupo t . Dicho cambio se compensa exactamente con un cambio opuesto en la proporción de los otros grupos (Ha, 2024; Septya y cols., 2024).

Si la proporción poblacional del grupo t aumenta en pc por ciento, tal que $\phi(t) \rightarrow (\phi(t)(1 + pc))$, el impacto total estimado sobre la pobreza se expresa como:

$$\Delta P = \left[\phi(t) * P(t; z, \alpha) - \sum_{k \neq t} \frac{\phi(t)}{1 - \phi(t)} * \phi(k) * P(k; z, \alpha) \right] * pc \quad (9)$$

Si la proporción poblacional del grupo s aumenta en absoluto pc por ciento de la población total, de forma que $\phi(t) \rightarrow (\phi(t)(1 + pc))$, el impacto total estimado sobre la pobreza es el siguiente:

$$\Delta P = \left[P(t; z, \alpha) - \sum_{k \neq s} \frac{\phi(k)}{1 - \phi(t)} * P(k; z, \alpha) \right] * pc \quad (10)$$

Donde $P(t; z, \alpha)$ es el índice de pobreza FGT para el subgrupo k y $\phi(k)$ es la proporción de la población perteneciente a dicho subgrupo.

5.3 Pobreza FGT: descomposición por subgrupos poblacionales

Esta descomposición se expresa como:

$$\hat{P}(z; \alpha) = \sum_{g=1}^G \hat{\phi}(g) \hat{P}(z; \alpha; g) \quad (11)$$

Donde G denota el número de subgrupos poblacionales. Los resultados presentan el índice FGT estimado para cada subgrupo g , $\hat{P}(z; \alpha; g)$, así como la proporción poblacional estimada correspondiente a dicho subgrupo, $\hat{\phi}(g)$. Asimismo, la contribución absoluta del subgrupo g a la pobreza total está dada por $\hat{\phi}(g) \hat{P}(z; \alpha; g)$, mientras que su contribución relativa a la pobreza total se calcula como $(\hat{\phi}(g) \hat{P}(z; \alpha; g)) / \hat{P}(z; \alpha)$.

5.4 Descomposición del cambio en la pobreza FGT por componentes de pobreza y población (descomposición sectorial)

Las medidas aditivas de pobreza, como los índices FGT (Ogwang y Mwabu, 2024; Bossert y cols., 2022), pueden expresarse como la suma de las contribuciones de pobreza de los distintos subgrupos de población (Bárcena-Martín y Cantó, 2025). Cada subgrupo contribuye de acuerdo con su proporción poblacional y su nivel de pobreza.

Así, el cambio en la pobreza a lo largo del tiempo depende de la variación en estos dos componentes. Denotando la proporción poblacional del grupo k en el periodo 1 por $\phi_1(k)$, el cambio en la pobreza entre los dos periodos se expresa como (Huppi y Ravallion, 1991; Duclos y Araar, 2006):

$$P_2 - P_1 = \left[\sum_{k=1}^K \phi_1(k) (P_2(k; z, \alpha) - P_1(k; z, \alpha)) \right] + \left[\sum_{k=1}^K P_1(k; z, \alpha) (\phi_2(k) - \phi_1(k)) \right] + \left[\sum (P_2(k; z, \alpha) - P_1(k; z, \alpha)) (\phi_2(k) - \phi_1(k)) \right] \quad (12)$$

Donde $P_2 - P_1$ representa la variación en la pobreza entre los periodos 1 y 2. El componente C1 recoge los efectos intra-sectoriales o intra-grupales (es decir, dentro del propio grupo), mientras que C2 corresponde al impacto derivado de los cambios en las proporciones de los subgrupos, asociado al efecto demográfico o sectorial. Finalmente, C3 refleja el efecto de interacción.

Si el periodo de referencia es el inicial, se utiliza la ecuación (12). Si el periodo de referencia es el final, la descomposición toma la forma:

$$P_2 - P_1 = \left[\sum_{k=1}^K \phi_2(k) (P_2(k; z, \alpha) - P_1(k; z, \alpha)) \right] + \left[\sum_{k=1}^K P_2(k; z, \alpha) (\phi_1(k) - \phi_2(k)) \right] + \left[\sum (P_2(k; z, \alpha) - P_1(k; z, \alpha)) (\phi_1(k) - \phi_2(k)) \right] \quad (13)$$

Para eliminar la arbitrariedad en la elección del periodo de referencia, puede emplearse el enfoque de descomposición de Shapley, encontrando:

$$P_2 - P_1 = \left[\sum_{k=1}^K \bar{\phi}(k)(P_2(k; z; \alpha) - P_1(k; z; \alpha)) \right] + \left[\sum_{k=1}^K \bar{P}(k; z; \alpha)(\phi_2(k) - \phi_1(k)) \right] \quad (14)$$

Donde $\bar{\phi}(k)$ es la proporción poblacional promedio $= 0,5(\phi_1(k) + \phi_2(k))$ y $\bar{P}(k; z; \alpha) = 0,5(P_1(k; z; \alpha) + P_2(k; z; \alpha))$.

5.5 Dominancia de pobreza

La distribución 1 domina a la distribución 2 en el orden s sobre el rango condicional $[Z^-, Z^+]$ si sólo si:

$$P_1(\xi; \alpha) > P_2(\xi; \alpha) \forall \xi \in [Z^-, Z^+] \quad \text{para } \alpha = s - 1 \quad (15)$$

Esto implica la comparación de las curvas de dominancia estocástica en el orden s o de las curvas FGT con $\alpha = s - 1$. Esta aplicación examina los puntos en los cuales ocurre una reversión en las condiciones de dominancia. En otras palabras, identifica los puntos de cruce de las curvas de dominancia, es decir, los valores de ξ y $P_1(\xi; \alpha)$ para los cuales:

$$P_1(\xi; \alpha) = P_2(\xi; \alpha) \quad \text{cuando} \\ \text{sign}[P_1(\xi - \eta; \alpha) - P_2(\xi - \eta; \alpha)] = \\ \text{sign}[P_2(\xi - \eta; \alpha) - P_1(\xi - \eta; \alpha)],$$

para un valor pequeño de η .

Los puntos de cruce de ξ también pueden denominarse "líneas críticas de pobreza".

5.6 Índice de pobreza multidimensional (MPI)

El MPI es un indicador compuesto de pobreza que considera tanto la distribución de las áreas de privación como su prevalencia (Apéndice 1) (Tigre,

2020; Sadiq y Sani, 2022; Salari y cols., 2024). A continuación, se presentan los índices involucrados en su medición:

Proporción multidimensional de pobreza (H):

Corresponde a la proporción de personas que han sido clasificadas como pobres multidimensionales, es decir, aquellas que se encuentran por debajo de la línea de pobreza (Bhuiyan y cols., 2023), y se expresa como:

$$H = q(k)/n \quad (16)$$

El número (o conteo) de personas pobres multidimensionales según el parámetro k se denota como $q(k)$.

$$q(k) = \sum_{i=1}^n p_k(x_i; z) \quad (17)$$

La proporción promedio de privaciones entre la población pobre se define como la intensidad de la pobreza (A), también conocida como la amplitud de la pobreza (Marcelino y Cunha, 2023). Se expresa de la siguiente manera:

$$A = \frac{\sum_{i=1}^q c_i(k)}{q(k)} \quad (18)$$

El porcentaje de los d indicadores en los que una persona pobre multidimensional promedio presenta privaciones corresponde a la intensidad de la pobreza (Li y He, 2024). La medida M_0 se denomina proporción ajustada de pobreza cuando $\alpha = 0$.

$$M_0 = HA \quad (19)$$

Cuando $\alpha = 1$, se utiliza la medida M_1 , denominada brecha de pobreza ajustada, la cual se define como el promedio ponderado de las brechas de pobreza específicas por el indicador. G representa la brecha de pobreza.

$$M_1 = HAG \quad (20)$$

$$G = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^d g_{ij}^1(k)}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^d g_{ij}^0(k)} \quad (21)$$

Finalmente, cuando $\alpha = 2$, la brecha de pobreza cuadrática ajustada (M_2) se calcula como el promedio ponderado de las brechas de pobreza cuadráticas específicas por indicador. S representa la severidad de la pobreza.

$$M_2 = H \times A \times S \quad (22)$$

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^d g_{ij}^2(k)}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^d g_{ij}^0(k)} \quad (23)$$

Seth y Alkire (2014), citados por Sadiq y Sani (2022), propusieron una medida de desigualdad aditivamente descomponible, que es un múltiplo positivo de la varianza y que incluye componentes intragrupo y entre grupos. La medida de desigualdad I^q utiliza el vector de puntajes de privación de las q personas en situación de pobreza $c_i(k)$ para cuantificar la desigualdad entre los pobres a nivel nacional o subnacional.

$$I^q = \frac{\tilde{\beta}}{q} \sum_{i=1}^q [c_i(k) - A]^2 \quad (24)$$

Para calcular la medida de desigualdad, la diferencia entre el puntaje de privación de cada persona pobre y la intensidad promedio se eleva al cuadrado; luego, las distancias cuadráticas se suman y se multiplican por una constante. Se establece $\beta = 1/49$ dado que los puntajes de privación de las personas pobres varían entre 0 y 1. Este valor representa el

máximo permitido para el indicador de desigualdad, garantizando que dicho indicador esté acotado entre cero y uno, considerando el rango de puntajes de privación.

No obstante, un menor grado de pobreza o una reducción en los niveles de pobreza no implica necesariamente que todas las regiones o categorías demográficas hayan experimentado una disminución equitativa de la pobreza (Sadiq y Sani, 2022; Sadiq y Grema, 2024; Sadiq y cols., 2025).

6 Resultados y discusión

6.1 El papel del NEAZDP en la movilidad social de la pobreza entre el grupo beneficiario

El análisis de la Tabla 2 revela la movilidad social y económica unidimensional de la pobreza dentro del grupo beneficiario a medida que el programa avanza desde el periodo inicial hasta el periodo final. La matriz muestra que, durante el primer trimestre de ejecución del programa, el 24,17% de los beneficiarios se encontraba significativamente por debajo del umbral de pobreza. Posteriormente, conforme el programa avanzó en el tiempo, en el segundo trimestre la proporción de beneficiarios por debajo de dicho umbral disminuyó significativamente al 16,67%. Esta reducción sostenida en los niveles de pobreza se mantuvo hasta el tercer trimestre, donde el porcentaje descendió al 15,83%. Sin embargo, durante el último trimestre de ejecución del programa, se observó una reversión repentina en la tendencia, con un aumento en la proporción de pobreza entre los beneficiarios del área de estudio, alcanzando un 20,83% por debajo del umbral de pobreza.

Tabla 1. Marco muestral de beneficiarios y no beneficiarios.

Categoría	Gobiernos locales (LGA)	Distritos administrativos (DA)	Aldeas agrupadas	Aldeas	SF	SS	
Beneficiarios (Tratamiento)	Bade	Dagona	Dala	Gabarwa	15	5	
				Mainiya	15	5	
		Tagali	Lafiyami	Madamuwa	15	5	
		Bizi	Murza	Misilli	15	5	
	Bursari	Dumburi	Dadigar	Baya Mallum	15	5	
				Diga	15	5	
		Gadine	Gamsa West	Gamsa East	15	5	
		Daskum	Gangawa	Kagadama	15	5	
	Geidam	Balle	Bayamari	Malango	15	5	
				Kelluri	15	5	
		Damaya	Mobarti	Gallaba	15	5	
		Ajiri Dapchi	Ajiri Geidam	Matakuskum	15	5	
	Jakusko	Muguram	Jaba	Dagayak	15	5	
				Garin Maji	15	5	
		Gamjam	Nasari	Garin Tsaiha	15	5	
Lafiya Loiloi		Buduwa	Gamya	15	5		
Sub-total	4		12	24	360	120	
<i>Efecto de derrame (Spill-over)</i>							
No beneficiarios	Tarmuwa	–	–	Lantewa	–	17	
		–	–	Biriri	–	17	
	Nangere	–	–	Dawasa	–	17	
		–	–	S/Gari Nangere	–	17	
	Fune	–	–	Dogon Kuka	–	17	
		–	–	Damagum	–	17	
	Fika	–	–	Janga	–	18	
		–	–	Gadaka	–	18	
	Sub-total	4	–	8	–	138	
	<i>Grupo de control</i>						
	No beneficiarios	Damaturu	–	–	Maisandari	–	17
			–	–	Dukumari	–	17
		Gujba	–	–	Katarko	–	17
			–	–	Kasesa	–	17
		Gulani	–	–	Bara	–	17
		–	–	Shishiwaji	–	17	
Potiskum		–	–	Mamudo	–	18	
		–	–	Garin Jaji	–	18	
Sub-total		4	–	8	–	138	
Total		12	4	12	40		396

Fuente: Informe NEAZDP (2022) y encuesta de reconocimiento (2022)

Tabla 2. Movilidad social unidimensional de la pobreza para el grupo beneficiario

Periodo inicial (BMI)	Periodo final (AMI)				Total
	0,0 – 0,25	0,25 – 0,5	0,5 – 0,75	0,75 – 1,0	
0,0 – 0,25	0,241667 (-0,01342) [-18,0073]^	0,091667 (-0,01447) [-6,33674]^	0,008333 (-0,00845) [-0,9857]^NS	0,008333 (-0,00827) [-1,00753]^NS	0,291667 (-3,6E-05) [-8172,22]^
0,25 – 0,5	0,108333 (-0,0145) [-7,46882]^	0,166667 (-0,01986) [-8,39025]^	0,091667 (-0,01846) [-4,96439]^	0,041667 (-0,017) [-2,45069]^	0,35 (-3,9E-05) [-8995,12]^
0,5 – 0,75	0,008333 (-0,00815) [-1,02304]^NS	0,15 (-0,01669) [-8,98535]^	0,158333 (-0,02017) [-7,85053]^	0,058333 (-0,0151) [-3,86247]^	0,333333 (-2,6E-05) [-12679,1]^
0,75 – 1,0	0 (-0,00033) [0]^NS	0,033333 (-0,00986) [-3,3823]^	0,125 (-0,01581) [-7,90809]^	0,208333 (-0,02311) [-9,01317]^	0,35 (-2,3E-05) [-15125,3]^
Total	0,266667 (-3,1E-05) [-8672,09]^	0,316667 (-2,5E-05) [-12586,1]^	0,258333 (-3,9E-05) [-6591,82]^	0,266667 (-2,8E-05) [-9379,76]^	1 0 -

Nota: Los valores entre paréntesis () y corchetes [] representan el error estándar y los estadísticos t, respectivamente; los símbolos ^ y NS indican significancia al 1% y no significancia, respectivamente. Fuente: Encuesta de campo, 2023.

La disminución inicial de los niveles de pobreza a lo largo de las fases del programa indica una movilidad económica positiva para los beneficiarios, quienes inicialmente lograron mejorar sus condiciones económicas, posiblemente accediendo a mejores oportunidades laborales o incrementando sus ingresos gracias al apoyo del programa. No obstante, el aumento en los niveles de pobreza en la fase final refleja una reversión en la movilidad económica, lo que podría implicar que los avances logrados en las etapas anteriores no fueron sostenibles, o que factores externos —como recesiones económicas, cambios en políticas públicas o problemas operativos del programa— provocaron un deterioro en las condiciones económicas de los beneficiarios.

Estas fluctuaciones en los niveles de pobreza pueden afectar la estabilidad social. Un incremento repentino, como el observado en la última fase, podría generar malestar social o descontento entre los participantes. En consecuencia, los responsables de la formulación de políticas deberían considerar los factores que contribuyeron al aumento de la pobreza en esta etapa final. Esto podría implicar abordar problemas estructurales, mejorar los mecanismos de monitoreo y evaluación del programa, o fortalecer el apoyo a largo plazo para garantizar mejoras

sostenidas tanto económicas como sociales.

En síntesis, aunque el programa NEAZDP mostró impactos positivos iniciales en la reducción de la pobreza y la promoción de la movilidad entre los beneficiarios, el incremento de la pobreza en la última fase evidencia desafíos en la sostenibilidad de los logros alcanzados. Abordar estas limitaciones resulta esencial para asegurar que las intervenciones conduzcan a mejoras duraderas en las condiciones de vida de las poblaciones beneficiarias.

6.2 Impacto del crecimiento y la redistribución sobre la pobreza de los beneficiarios del NEAZDP

Al evaluar los efectos del crecimiento económico y la redistribución del ingreso en la reducción de la pobreza del grupo beneficiario (Tabla 3 y Figura 3), se observó que tras la intervención del programa, la pobreza disminuyó en un 6,20% como resultado del crecimiento económico. Sin embargo, la redistribución del ingreso provocó un aumento en la pobreza entre los beneficiarios después de la intervención, lo cual sugiere la existencia de un sistema ineficiente de administración tributaria, así como de medidas

de protección social poco favorables a los pobres, que tienden a beneficiar más a los no pobres dentro del grupo de beneficiarios.

A pesar del impacto positivo del programa en el crecimiento económico, el débil estado del gasto público (por ejemplo, subsidios y medidas de protección social) y la ineficiencia del sistema impositivo progresivo constituyen obstáculos que limitan el éxito y la sostenibilidad a largo plazo del programa en el área de estudio.

En otras palabras, aunque el NEAZDP ha tenido un efecto positivo en el crecimiento económico y en la reducción de la pobreza, la ineficaz redistribución del ingreso, el gasto público insuficiente y la deficiente administración tributaria socavan sus logros y sostenibilidad. Esto evidencia la necesidad de reformas específicas en materia fiscal, de gasto público y de medidas de protección social, con el

fin de fortalecer el apoyo a las poblaciones más vulnerables.

En términos más concretos, los resultados muestran que, mientras el crecimiento económico inducido por el NEAZDP redujo la pobreza en un 6,20%, la redistribución ineficiente del ingreso la incrementó entre los beneficiarios, evidenciando las deficiencias en la gestión tributaria. Esto sugiere que los beneficios del crecimiento económico no están llegando a los sectores más pobres de la comunidad, lo que podría agravar las desigualdades sociales.

Por tanto, para que el NEAZDP logre de manera sostenible sus objetivos de reducción de la pobreza, se deben reformar las políticas fiscales y garantizar una distribución más equitativa del ingreso, de modo que los beneficiarios más pobres puedan recibir un apoyo efectivo y participar plenamente de los beneficios del programa.

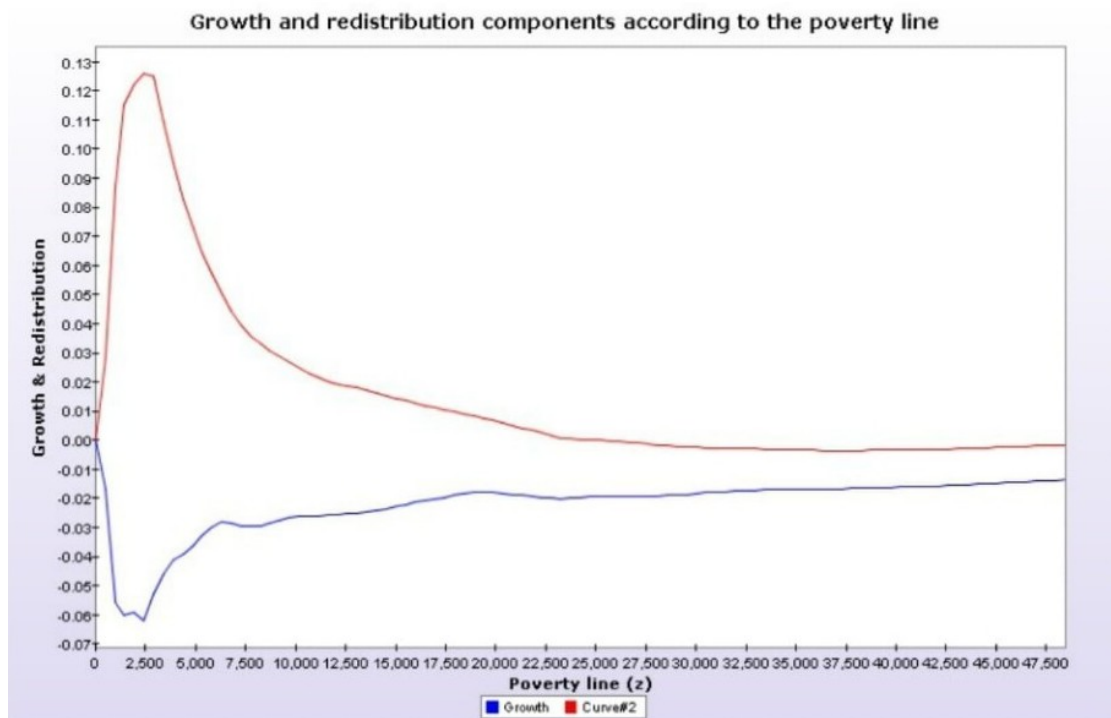


Figura 3. Efectos del crecimiento y la redistribución sobre la pobreza del NEAZDP

Tabla 3. Impacto del crecimiento y la redistribución sobre la pobreza del grupo beneficiario

I. Índices de pobreza			
Ítems	Inicial	Final	
Referencia 2			
Enfoque Datt y Ravallion (1992)			
Estimación	0,36166427 (0,02728206) 13,2565***	0,42506710 (0,02850802) 14,9104***	
Diferencia Índice1 – Índice2	0,06340283 (0,03962348)	1,60013 ^{NS}	
Covarianza Índice1 – Índice2	-0,00000650		
Enfoque de Shapley			
Estimación	0,36166427 (0,02728206) 13,2565***	0,42506710 (0,02850802) 14,9104***	
Diferencia Índice1 – Índice2	0,06340283 (0,03962348)	1,60013 ^{NS}	
Covarianza Índice1 – Índice2	-0,00000650		
Referencia 1			
Enfoque Datt y Ravallion (1992)			
Estimación	0,36166427 (0,02728206) 13,2565***	0,42506710 (0,02850802) 14,9104***	
Diferencia Índice1 – Índice2	0,06340283 (0,03962348)	1,60013 ^{NS}	
Covarianza Índice1 – Índice2	-0,00000650		
Enfoque de Shapley			
Estimación	0,36166427 (0,02728206) 13,2565***	0,42506710 (0,02850802) 14,9104***	
Diferencia Índice1 – Índice2	0,06340283 (0,03962348)	1,60013 ^{NS}	
Covarianza Índice1 – Índice2	-0,00000650		
Línea de pobreza	2417,78002930 (0,00000000)		
II. Descomposición (Contribución)			
Contribución de:	Crecimiento	Redistribución	Residuos
Referencia 2			
	-0,06196356 (0,06077006)	0,12571451 (0,12385039)	-0,00034812 N.A
	1,01964 ^{NS}	1,01505 ^{NS}	-
	-0,06213762 (0,07908917)	0,12554045 (0,07908917)	0,00000000 (0,0)
NEAZDP	0,785665 ^{NS}	1,58733 ^{NS}	-
Referencia 1			
	-0,06231168 (0,09838520)	0,12536639 (0,05125128)	0,00034812 N.A
	0,633344 ^{NS}	2,44611 ^{**}	-
	-0,06213762 (0,07908917)	0,12554045 (0,07908917)	0,00000000 (0,0)
	0,785665 ^{NS}	1,58733 ^{NS}	-

Nota: El valor entre paréntesis () representa el error estándar; los símbolos ***, **, * y NS indican significancia estadística al 1%, 5% y 10%, y no significancia, respectivamente. Fuente: Encuesta de campo, 2023.

6.3 Curva Pro-Pobre de los Beneficiarios del NEAZDP

Asimismo, al evaluar el crecimiento pro-pobre después de la participación en el programa, los resultados presentados en la Tabla 4 (representados en la Figura 4) muestran una disminución en la incidencia de crecimiento de la pobreza del 18,75% y una reducción significativa en la severidad del crecimiento de la pobreza del 17,22%. En términos generales, puede inferirse que las políticas del programa estuvieron dirigidas directamente a los más pobres; en otras palabras, las políticas del programa se enfocaron principalmente en la reducción de la pobreza.

De igual manera, puede concluirse que los ingresos de los hogares pobres del grupo beneficiario crecieron más rápidamente que los del conjunto de la población no beneficiaria. En síntesis, para que el crecimiento sea considerado pro-pobre, debe evidenciarse una disminución en la desigualdad de ingresos del grupo beneficiario en comparación con el grupo no beneficiario. Cabe destacar que el crecimiento pro-pobre es aquel que permite a las personas pobres participar activamente en las

actividades económicas y beneficiarse de manera proporcionalmente mayor que los no pobres del incremento global de los ingresos.

Esto sugiere que el programa ha logrado identificar y beneficiar de manera efectiva a los individuos más pobres dentro del grupo beneficiario, generando mejoras significativas en sus condiciones de vida. La reducción en la severidad de la pobreza también implica que los miembros más vulnerables están experimentando una pobreza menos extrema, lo cual constituye un resultado positivo para la reducción sostenida de la pobreza y el mejoramiento del bienestar en la región.

En otras palabras, el NEAZDP ha dirigido eficazmente sus esfuerzos hacia los hogares más pobres, lo que ha derivado en reducciones significativas tanto en la incidencia como en la severidad de la pobreza, garantizando que los hogares pobres se beneficien del crecimiento económico en comparación con el grupo no beneficiario. Por lo tanto, para ampliar su impacto, el programa debería continuar enfocándose en un crecimiento equitativo de los ingresos e implementar medidas que contribuyan a reducir aún más la desigualdad económica.

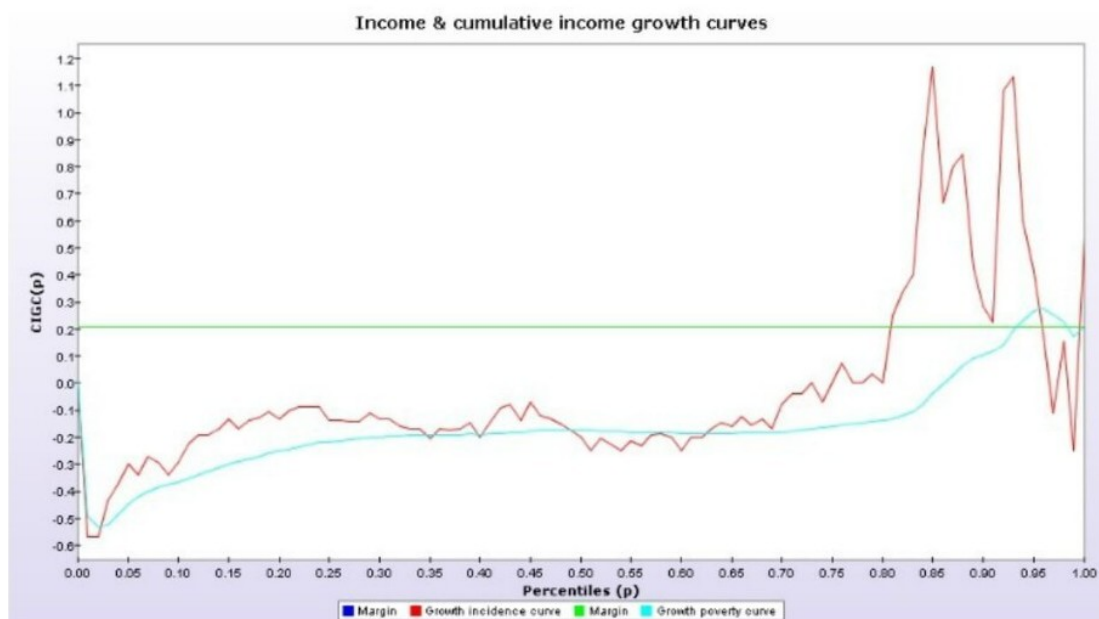


Figura 4. Curva pro-pobre del grupo beneficiario

Tabla 4. Curva pro-pobre del grupo beneficiario

Ítems	Valor estimado
Curva de incidencia del crecimiento	-0,18750001 (0,15652524) 1,19789 ^{NS}
Curva de pobreza del crecimiento	-0,17221867 (0,08624621) 1,996826 ^{**}

Nota: El valor entre paréntesis () representa el error estándar; los símbolos ***, **, * y NS indican significancia estadística al 1%, 5% y 10%, y no significancia, respectivamente. Fuente: Encuesta de campo, 2023.

6.4 Impacto del cambio demográfico en la pobreza de los beneficiarios del NEAZDP

Al evaluar el impacto demográfico sobre la pobreza (en relación con el grupo) (Tabla 5), entre los grupos beneficiarios y de desbordamiento (*spill-over*), respectivamente, se observó que, ante un cambio (aumento) del 10% en el tamaño de cada grupo, la pobreza disminuiría significativamente en un 0,64% y aumentaría en un 0,86%, según lo evidenciado por sus respectivos coeficientes de impacto al 10% de nivel de significancia.

Asimismo, los resultados mostraron una disminución en la proporción de personas pobres en el grupo beneficiario (de 28,03% a 26,21%) frente a un aumento en el grupo de desbordamiento (de 39,40% a 43,34%). Además, en términos relativos a la población, los resultados indicaron que un aumento del 10% en la población de los grupos beneficiario y de desbordamiento provocaría una reducción y un incremento significativos de la pobreza del 1,63% y 2,18%, respectivamente.

Tabla 5. Impacto del cambio demográfico en la pobreza

Ítems	Pobreza antes	Pobreza después	Impacto total
Beneficiarios vs. Desbordamiento			
Relativo al grupo (RG)	0,34835789 (0,07950081) 4,38182 ^{***}	0,33988169 (0,08708012) 3,90309 ^{***}	-0,00847619 (0,01028815) 0,823879 ^{NS}
Relativo a la población (RP)	0,34835789 (0,07950081) 4,38182 ^{***}	0,32684656 (0,06844059) 4,77562 ^{***}	-0,02151132 (0,00779362) 2,760119 ^{***}
Línea de pobreza		11021,84	
Beneficiarios vs. Control			
Relativo al grupo (RG)	0,33328196 (0,08290117) 4,02023 ^{***}	0,34139459 (0,08831333) 3,86572 ^{***}	0,00811263 (0,00637910) 1,27175 ^{NS}
Relativo a la población (RP)	0,33328196 (0,08290117) 4,02023 ^{***}	0,35819332 (0,06957350) 5,14842 ^{***}	0,02491135 (0,00721471) -3,45286 ^{***}
Línea de pobreza		10733,72	
Beneficiarios vs. Desbordamiento y Control			
Relativo al grupo (RG)	0,31974724 (0,07714256)	0,32697389 (0,08159047)	0,00722665 (0,00567126)

Continúa en la siguiente página...

Tabla 5 – Continuación de la página anterior

	4,14489***	4,0075***	1,27426 ^{NS}	
Relativo a la población (RP)	0,31974724 (0,07714256)	0,34193803 (0,06287188)	0,02219079 (0,00710749)	
	4,14489***	5,43865***	3,12217***	
Línea de pobreza			10550,48	

Grupo	Estimación	Proporción antes	Proporción después	Impacto
Beneficiarios vs. Desbordamiento				
1 (RG)	0,35214436 (0,05010282) 7,02843***	0,28030601 (0,33943272) 0,82581 ^{NS}	0,26207889 (0,33590802) 0,78021***	-0,00641858 (0,00837355) 0,76653 ^{NS}
2	0,21800661 (0,00966169) 22,564***	0,39403409 (0,38837504) 1,01457 ^{NS}	0,43343750 (0,42721254) 1,01457 ^{NS}	0,00859020 (0,00808642) 1,0623 ^{NS}
1 (RP)	0,35214436 (0,05010282) 7,02843***	0,28030601 (0,33943272) 0,82581 ^{NS}	0,23404829 (0,30205948) 0,77484 ^{NS}	-0,01628939 (0,01392726) 1,169605 ^{NS}
2	0,21800661 (0,00966169) 22,564***	0,39403409 (0,38837504) 1,01457 ^{NS}	0,49403409 (0,38837504) 1,27205 ^{NS}	0,02180066 (0,00096617) 22,564***
Beneficiarios vs. Control				
1 (RG)	0,32265320 (0,04848970) 6,65406***	0,28030601 (0,33943272) 0,82581***	0,26676916 (0,33022633) 0,80784 ^{NS}	-0,00436771 (0,00669527) 0,652358 ^{NS}
3	0,50126922 (0,04570181) 10,9683***	0,32565993 (0,32955313) 0,98819 ^{NS}	0,35822592 (0,36250844) 0,98819 ^{NS}	0,01632433 (0,01503607) 1,08568 ^{NS}
1 (RP)	0,32265320 (0,04848970) 6,65406***	0,28030601 (0,33943272) 0,82581 ^{NS}	0,23873856 (0,29634706) 0,8056 ^{NS}	-0,01341187 (0,01360754) 0,98562 ^{NS}
3	0,50126922 (0,04570181) 10,9683***	0,32565993 (0,32955313) 0,98819 ^{NS}	0,42565993 (0,32955313) 1,29163 ^{NS}	0,05012692 (0,00457018) 10,9683***
Beneficiarios vs. Desbordamiento y Control				
1 (RG)	0,32265320 (0,04848970) 6,65406***	0,28030601 (0,33943272) 0,82581 ^{NS}	0,26676916 (0,33022633) 0,80784 ^{NS}	-0,00436771 (0,00669527) 0,652358 ^{NS}
2	0,19400491 (0,00931401) 20,8294***	0,39403409 (0,38837504) 1,01457 ^{NS}	0,37500495 (0,38642935) 0,97044 ^{NS}	-0,00369175 (0,00458291) 0,805547 ^{NS}
3	0,46938863 (0,04114868) 11,4071***	0,32565993 (0,32955313) 0,98819 ^{NS}	0,35822592 (0,36250844) 0,98819 ^{NS}	0,01528611 (0,01413320) -1,08157 ^{NS}
1 (RP)	0,32265320	0,28030601	0,23873856	-0,01341187

Continúa en la siguiente página...

Tabla 5 – Continuación de la página anterior

	(0,04848970)	(0,33943272)	(0,29634706)	(0,01360754)
	6,65406***	0,82581 ^{NS}	0,8056 ^{NS}	0,98562 ^{NS}
2	0,19400491	0,39403409	0,33560154	-0,01133620
	(0,00931401)	(0,38837504)	(0,34767237)	(0,00878248)
	20,8294***	1,01457 ^{NS}	0,96528 ^{NS}	1,290774 ^{NS}
3	0,46938863	0,32565993	0,42565993	0,04693886
	(0,04114868)	(0,32955313)	(0,32955313)	(0,00411487)
	11,4071***	-0,98819 ^{NS}	1,29163 ^{NS}	11,4071***

Nota: Los valores entre paréntesis () representan el error estándar; los símbolos ***, **, * y NS indican significancia estadística al 1%, 5% y 10%, y no significancia, respectivamente. 1 = Grupo beneficiario; 2 = *Spill-over*; 3 = Control. Fuente: Encuesta de campo, 2023.

Por otro lado, en la comparación entre el grupo beneficiario y el grupo de control, un aumento del 10% en el tamaño de cada grupo reduciría significativamente la pobreza en 0,44% e incrementaría en 1,63%, respectivamente. No obstante, en relación con la población, un aumento del 10% en el tamaño del grupo beneficiario reduciría la pobreza en 1,34%, mientras que, para el grupo de control, la pobreza aumentaría significativamente en 5,01%.

Estos resultados evidencian que el NEAZDP ha logrado reducir efectivamente la pobreza entre los beneficiarios en comparación con los grupos de desbordamiento y control, ya que un aumento del 10% en el tamaño del grupo beneficiario conlleva una reducción significativa del 1,34% en la pobreza. Por tanto, para maximizar su impacto, el programa debería enfocarse en ampliar su alcance, asegurando al mismo tiempo la implementación de medidas efectivas para evitar el incremento de la pobreza en los grupos de control y de desbordamiento.

En otras palabras, los resultados indican que el NEAZDP reduce eficazmente la pobreza dentro del grupo beneficiario, donde un aumento del 10% en el tamaño del grupo genera una disminución del 1,34% en la pobreza. Sin embargo, los grupos de desbordamiento y de control experimentan aumentos de pobreza ante incrementos poblacionales similares. Esto sugiere que el programa está dirigido exitosamente al grupo beneficiario, pero podría estar contribuyendo a una mayor desigualdad y pobreza en las áreas circundantes. Con el fin de mejorar el impacto general, el programa debería considerar extender sus beneficios a los grupos no beneficiarios o mitigar los efectos negativos que estos enfrentan.

Asimismo, al evaluar la descomposición de la pobreza en los dos grupos —entre el grupo beneficiario y el grupo de desbordamiento— (Tabla 6), la evidencia empírica mostró que el 28,34% y el 9,87% del 35,21% significativo de personas pobres dentro del grupo beneficiario eran relativamente pobres (poseen necesidades básicas, pero enfrentan exclusión social) y absolutamente pobres (carecen de necesidades básicas), respectivamente. Por el contrario, del 21,80% significativo de personas pobres en el grupo de desbordamiento, el 8,59% presentaban pobreza relativa mientras que el 24,66% presentaban pobreza absoluta.

De igual modo, entre los grupos beneficiario y de control, del 32,27% de personas significativamente pobres en el primero, el 27,15% presentaban pobreza relativa y el 9,04% pobreza absoluta. En contraste, dentro del grupo de control, del 50,13% de pobres, el 48,98% eran relativamente pobres y el 16,32% absolutamente pobres.

No obstante, al evaluar la descomposición de la pobreza por grupos (una perspectiva más amplia, es decir, general), entre los beneficiarios frente a los grupos de desbordamiento y de control, se observó que del 32,27% de pobres dentro del grupo beneficiario, el 28,29% y el 9,04% eran relativamente y absolutamente pobres, respectivamente. En contraste, del 19,40% de pobres dentro del grupo de desbordamiento, el 23,91% y el 7,65% eran relativamente y absolutamente pobres, respectivamente. De manera similar, del 46,94% significativo de pobres en el grupo de control, el 47,81% y el 15,29% eran relativamente y absolutamente pobres, respectivamente.

Estos resultados muestran que el NEAZDP ha tenido mayor éxito en la reducción de la pobreza absoluta entre los beneficiarios en comparación con los grupos de desbordamiento y de control, disminuyendo de manera significativa la pobreza absoluta, aunque aún persiste una notable proporción de pobreza relativa. Por lo tanto, el programa debe continuar enfocándose en la reducción de la pobreza absoluta, al mismo tiempo que desarrolla intervenciones específicas para abordar la pobreza relativa y la exclusión social.

En otras palabras, los resultados sugieren que el NEAZDP ha tenido un impacto más sustancial en la reducción de la pobreza absoluta que en la pobreza relativa. El grupo beneficiario presenta una mayor proporción de individuos con pobreza relativa en comparación con la pobreza absoluta, lo que indica que, aunque sus necesidades básicas están mayormente cubiertas, persisten problemas de exclusión social. En contraste, tanto los grupos de desborda-

miento como el de control experimentan mayores tasas de pobreza absoluta, especialmente el grupo de control.

Esto pone de manifiesto la necesidad de que el NEAZDP no solo se centre en reducir la pobreza absoluta, sino también en abordar la exclusión social y la pobreza relativa, a fin de mejorar el bienestar general de las comunidades.

Asimismo, desde una perspectiva más amplia —es decir, la descomposición sectorial de las diferencias en la pobreza (natural)—, entre los grupos beneficiario, desbordamiento y de control, los resultados evidenciaron una disminución drástica en la proporción de hogares del grupo beneficiario que enfrentan pobreza absoluta, en comparación con sus contrapartes de los grupos de desbordamiento y de control (Tabla 7).

Tabla 6. Descomposición de la pobreza FGT (dos grupos y general).

Ítems	Estimaciones
Beneficiario vs. Spill-over	
Línea de pobreza	11021,84
Estimación	0,34835789 (0,07950081) 4,38182***
Diferencia absoluta en la contribución	0,13413775 (0,05648720) 2,37466**
Diferencia porcentual en la contribución	0,03676145 (0,47523284) 0,07735 ^{NS}
Beneficiario vs. Control	
Línea de pobreza	10733,72
Estimación	0,33328196 (0,08290117) 4,02023***
Diferencia absoluta en la contribución	-0,17861602 (0,07945089) 2,248131**
Diferencia porcentual en la contribución	-0,21843864 (0,57176186) 0,382045 ^{NS}
Beneficiario vs. Desbordamiento y Control	
Línea de pobreza	10550,48046875 (0,00000000)
Estimación	0,31974724 (0,07714256) 4,14489***

Nota: Los valores entre paréntesis () representan el error estándar; los símbolos ***, **, * y NS indican significancia estadística al 1%, 5% y 10%, y no significancia, respectivamente. Fuente: Encuesta de campo, 2023.

Continuación de la Tabla 6

Grupo	Estimación	Proporción poblacional	Contribución relativa	Contribución absoluta
Beneficiario vs. Desbordamiento				
1	0,35214436 (0,05010282) 7,02843***	0,28030601 (0,33943272) 0,82581 ^{NS}	0,28335276 (0,30223390) 0,93753 ^{NS}	0,09870818 (0,10549074) 0,9357 ^{NS}
2	0,21800661 (0,00966169) 22,564***	0,39403409 (0,38837504) 1,01457 ^{NS}	0,24659131 (0,28222683) 0,87373 ^{NS}	0,08590204 (0,08086418) 1,0623 ^{NS}
Beneficiario vs. Control				
1	0,32265320 (0,04848970) 6,65406***	0,28030601 (0,33943272) 0,82581 ^{NS}	0,27136672 (0,29265392) 0,92726 ^{NS}	0,09044163 (0,09593251) 0,94276 ^{NS}
3	0,50126922 (0,04570181) 10,9683***	0,32565993 (0,32955313) 0,98819 ^{NS}	0,48980537 (0,34020883) 1,43972 ^{NS}	0,16324329 (0,15036066) 1,08568 ^{NS}
Beneficiario vs. Desbordamiento y Control				
1	0,32265320 (0,04848970) 6,65406***	0,28030601 (0,33943272) 0,82581 ^{NS}	0,28285351 (0,30035448) 0,94173 ^{NS}	0,09044163 (0,09593251) 0,94276 ^{NS}
2	0,19400491 (0,00931401) 20,8294***	0,39403409 (0,38837504) 1,01457 ^{NS}	0,23907804 (0,27542734) 0,86803 ^{NS}	0,07644454 (0,07167942) 1,06648 ^{NS}
3	0,46938863 (0,04114868) 11,4071***	0,32565993 (0,32955313) 0,98819 ^{NS}	0,47806844 (0,34060581) 1,40358 ^{NS}	0,15286106 (0,14133203) 1,08157 ^{NS}
Total	—	1,0 (0,00) —	1,0 (0,00) —	0,31974724 (0,07714256) 4,14489***

Nota: Los valores entre paréntesis () representan el error estándar; los símbolos ***, **, * y NS indican significancia estadística al 1%, 5% y 10%, y no significancia, respectivamente. Fuente: Encuesta de campo, 2023.

Además, como resultado del impacto del programa, según lo reflejado por el impacto intragrupal, la proporción de hogares del grupo beneficiario que experimentan pobreza absoluta fue de 1,51%, frente al 2,40% de sus contrapartes del grupo de desbordamiento. De manera similar, la proporción de hogares del grupo beneficiario que enfrentan pobreza absoluta fue de 1,085%, frente al 2,09% de los del grupo de control.

En términos generales, puede inferirse que el impacto del programa desempeña un papel fundamental en la reducción de la pobreza absoluta entre los beneficiarios, en comparación con los grupos de desbordamiento y de control. No obstante, los

resultados obtenidos mediante el modelo de descomposición de Shapley mostraron una tendencia similar.

En conclusión, el NEAZDP ha reducido significativamente la pobreza absoluta entre los beneficiarios en comparación con los grupos de desbordamiento y de control, lo que demuestra su eficacia en la mitigación de la pobreza extrema. Por tanto, para ampliar su impacto general, el programa debería mantener su enfoque en la reducción de la pobreza absoluta, al tiempo que explora estrategias para mitigar la pobreza relativa y fortalecer la inclusión social en un sentido más amplio.

Tabla 7. Descomposición FGT de la pobreza (descomposición sectorial).

Ítems	Distribución (1)	Distribución (2)	Diferencia P(2) - P(1)
Beneficiario vs. Desbordamiento			
	<i>Beneficiario</i>	<i>Desbordamiento</i>	
Estimación (NA)	0,11783745 (0,03049792) 3,86379***	0,08572166 (0,02502065) 3,42604***	-0,03211579 (0,00737291) 4,355918***
Estimación (SA)	0,11783745 (0,03049792) 3,86379***	0,08572166 (0,2502065) 3,42604***	-0,03211579 (0,00737291) 4,355918***
Beneficiario vs. Control			
	<i>Beneficiario</i>	<i>Control</i>	
Estimación (NA)	0,11783745 (0,03049792) 3,86379***	0,07124325 (0,02222445) 3,20562***	-0,04659420 (0,01077736) 4,323341***
Estimación (SA)	0,11783745 (0,03049792) 3,86379***	0,07124325 (0,02222445) 3,20562***	-0,04659420 (0,01077736) 4,323341***

Nota: Los valores entre paréntesis () representan el error estándar; los símbolos ***, **, * y NS indican significancia estadística al 1%, 5% y 10%, y no significancia, respectivamente.

Nota adicional: NA = Enfoque natural; SA = Enfoque de Shapley. Fuente: Encuesta de campo, 2023.

Tabla 7. Continuación de la Tabla 7. (Detalle por grupos y enfoques NA/SA)

Grupo	Distribución (1)			Distribución (2)			Diferencia Cont. (2)-(1)
	Estimación	Proporción	Cont. Abs.	Estimación	Proporción	Cont. Abs.	
Panel A: Beneficiario vs. Desbordamiento							
1 (NA)	0,09089787	0,28030600	0,02547922	0,05386852	0,28030600	0,01509967	-0,01037955
	(0,01259371)	(0,33943273)	(0,02732501)	(0,00743065)	(0,33943273)	(0,01620270)	(0,01112231)
	7,21772***	0,82581 ^{NS}	0,93245 ^{NS}	7,2495***	0,82581 ^{NS}	0,93192 ^{NS}	0,933219 ^{NS}
2	0,08015536	0,39403407	0,03158394	0,06097051	0,39403407	0,02402446	-0,00755949
	(0,00362057)	(0,38837504)	(0,02970480)	(0,00264210)	(0,38837504)	(0,02263913)	(0,00706566)
	22,1389***	1,01457 ^{NS}	1,06326 ^{NS}	23,0765***	1,01457 ^{NS}	1,06119 ^{NS}	1,069892 ^{NS}
1 (SA)	0,09089787	0,28030600	0,02547922	0,05386852	0,28030600	0,01509967	-0,01037955
	(0,01259371)	(0,33943273)	(0,02732501)	(0,00743065)	(0,33943273)	(0,01620270)	(0,01112231)
	7,21772***	0,82581 ^{NS}	0,93245 ^{NS}	7,2495***	0,82581 ^{NS}	0,93192 ^{NS}	0,933219 ^{NS}
2	0,08015536	0,39403407	0,03158394	0,06097051	0,39403407	0,02402446	-0,00755949
	(0,00362057)	(0,38837504)	(0,02970480)	(0,00264210)	(0,38837504)	(0,02263913)	(0,00706566)
	22,1389***	1,01457 ^{NS}	1,06326 ^{NS}	23,0765***	1,01457 ^{NS}	1,06119 ^{NS}	1,069892 ^{NS}
Panel B: Beneficiario vs. Control							
1 (NA)	0,09089787	0,28030600	0,02547922	0,03868928	0,28030600	0,01084484	-0,01463438
	(0,01259371)	(0,33943273)	(0,02732501)	(0,00479623)	(0,33943273)	(0,01178852)	(0,01553649)
	7,21772***	0,82581 ^{NS}	0,93245 ^{NS}	8,0666***	0,82581 ^{NS}	0,91995 ^{NS}	0,941936 ^{NS}
3	0,18661886	0,32565992	0,06077428	0,12230989	0,32565992	0,03983143	-0,02094285
	(0,01677674)	(0,32955313)	(0,05605531)	(0,01162652)	(0,32955313)	(0,03653385)	(0,01952147)
	11,1237***	0,98819 ^{NS}	1,08418 ^{NS}	10,5199***	0,98819 ^{NS}	1,09026 ^{NS}	1,072811 ^{NS}
1 (SA)	0,09089787	0,28030600	0,02547922	0,03868928	0,28030600	0,01084484	-0,01463438
	(0,01259371)	(0,33943273)	(0,02732501)	(0,00479623)	(0,33943273)	(0,01178852)	(0,01553649)
	7,21772***	0,82581 ^{NS}	0,93245 ^{NS}	8,0666***	0,82581 ^{NS}	0,91995 ^{NS}	0,941936 ^{NS}
3	0,18661886	0,32565992	0,06077428	0,12230989	0,32565992	0,03983143	-0,02094285
	(0,01677674)	(0,32955313)	(0,05605531)	(0,01162652)	(0,32955313)	(0,03653385)	(0,01952147)
	11,1237***	0,98819 ^{NS}	1,08418 ^{NS}	10,5199***	0,98819 ^{NS}	1,09026 ^{NS}	1,072811 ^{NS}

Umbral de pobreza = 11788,41.

Nota: Los valores entre paréntesis () representan el error estándar; los símbolos ***, **, * y NS indican significancia estadística al 1%, 5% y 10%, y no significancia, respectivamente. Siglas: NA = Enfoque natural; SA = Enfoque de Shapley; Cont. Abs. = Contribución absoluta. Fuente: Encuesta de campo, 2023.

6.5 Dominio de la pobreza (Grupo beneficiario frente a grupos de desbordamiento y de control)

En la evaluación del dominio de la pobreza entre el grupo beneficiario y el grupo de desbordamiento, los resultados mostraron que la pobreza predomina en el grupo de desbordamiento en comparación con el grupo beneficiario (Tabla 8). En el cruce 1 (caso n° 1), el valor de cruce de pobreza para el grupo beneficiario fuera de la línea crítica de pobreza relativa fue de ₦7,647.18, mientras que el punto de cruce relativo para el grupo de desbordamiento fue de ₦7,657.59 en el cruce 2 (caso n° 2). De manera similar, en el cruce 3 (caso n° 2), la cantidad significativa requerida por el grupo beneficiario para superar la línea de pobreza relativa fue de ₦8,057.53, mientras que el grupo de desbordamiento necesitó una suma considerablemente mayor de ₦14,113.54 para superar dicha línea en el cruce 4 (caso n° 2).

La diferencia en el punto de cruce entre ambos grupos es leve entre los cruces 1 y 2, pero más amplia entre los cruces 3 (caso n° 1) y 4 (caso n° 2). Por otro lado, entre el grupo beneficiario y el grupo de control, la dominancia de la pobreza fue mayor en el grupo de control, como se evidencia al comparar los casos n° 1 y n° 2. Además, el valor de cruce de pobreza del grupo beneficiario fue de ₦46,296.82, frente al del grupo de control de ₦53,709.65. Cabe destacar que los valores de cruce de pobreza de

ambos grupos representan umbrales significativos; sin embargo, la diferencia marginal entre ellos es moderada.

El NEAZDP ha demostrado ser eficaz en la reducción de la pobreza en comparación con los grupos de desbordamiento y de control, ya que los beneficiarios requieren montos significativamente menores para superar la línea de pobreza relativa, lo que indica un mejor desempeño en la mitigación de la pobreza. No obstante, para aumentar su impacto, el programa debería profundizar sus intervenciones a fin de abordar las brechas de pobreza restantes y reducir las diferencias presentes en el grupo de control.

En otras palabras, los resultados indican que, aunque el NEAZDP ha sido moderadamente efectivo, la pobreza sigue siendo más dominante en el grupo de desbordamiento en comparación con el grupo beneficiario. El grupo beneficiario requiere menores recursos para salir de la pobreza relativa en comparación con el de desbordamiento, pero mayores recursos que el grupo de control. En general, el grupo de control presenta una dominancia de pobreza más alta. Estos hallazgos sugieren que el NEAZDP ha tenido éxito parcial en la reducción de la pobreza, pero enfatizan la necesidad de intervenciones más específicas para cerrar la brecha de pobreza y mejorar la situación tanto de los grupos de desbordamiento como de control.

Tabla 8. Dominancia de la pobreza entre los grupos beneficiario, de desbordamiento y de control.

Cruce	Valor de Z	Error estándar	Estadístico t	Caso
Beneficiario vs. Desbordamiento				
1	7647,18310547	157,33786159	48,60358	1
2	7657,59179688	156,71906348	48,8619	2
3	8057,53173828	254,47420782	31,66345	1
4	14113,53808594	665,59058712	21,20453	2
Beneficiario vs. Control				
1	46296,81640625	409,09327366	113,1693	1
2	53709,64843750	6245,16691867	8,600194	2

Nota: Caso n.º 1 = Antes, la Distribución n.º 1 domina a la Distribución n.º 2. Caso n.º 2 = Antes, la Distribución n.º 2 domina a la Distribución n.º 1. Fuente: Encuesta de campo, 2023.

6.6 El papel del NEAZDP en el estatus de pobreza multidimensional del grupo beneficiario frente a los grupos de desbordamiento y de control

Un examen preliminar del nivel de pobreza multidimensional mostró que, al nivel del umbral de

pobreza ($k = 0,33$), una proporción del 28,21% de los hogares en el grupo beneficiario se encontraban en condición de pobreza multidimensional, frente al 61,51% en el grupo de desbordamiento y el 52,99% en el grupo de control, según su respectivo índice de proporción de incidencia de pobreza (Tabla 9 y Figura 5a).

Tabla 9. Distribuciones del índice de pobreza multidimensional (MPI) del grupo beneficiario frente a los grupos de desbordamiento y de control.

Ítems	Beneficiarios	Desbordamiento	Control
Índice de incidencia (H)	0,282086	0,615061	0,529859
Intensidad (A)	0,366389	0,401897	0,386753
Índice de pobreza multidimensional (MPI)	0,103353	0,247191	0,204925
Brecha (Gap)	1,729339	1,488198	1,585633
Brecha de pobreza multidimensional (MPG)	0,178732	0,367869	0,324935
Severidad (S)	1,097565	0,895027	0,975874
Severidad de pobreza multidimensional (MPS)	0,113437	0,221243	0,199981
Desigualdad (IE)	3,21E-05	9,44E-05	6,43E-05
Contribución al total de pobreza (CG)	17	45	38
Proporción de la población pobre (PS)	30,38	34,68	34,94
Dimensión			
Educación (E)	0,008952 (8,662)	0,015704 (6,352877)	0,019007 (9,275217)
Salud (H)	0,009 (8,708198)	0,020142 (8,148421)	0,020157 (9,836424)
Nivel de vida (SL)	0,025337 (24,51539)	0,058761 (23,77151)	0,04826 (23,55028)
Medio ambiente (EN)	0,018764 (18,15555)	0,028173 (11,39714)	0,034167 (16,67294)
Empoderamiento (EM)	0,019778 (19,13596)	0,036744 (14,8648)	0,026848 (13,10163)
Capital social (S)	0,008817 (8,531108)	0,043181 (17,46851)	0,020548 (10,02689)
Riqueza (W)	0,012704 (12,29179)	0,044486 (17,99674)	0,035937 (17,53662)
MPI	0,103352 (100)	0,247191 (100)	0,204924 (100)

Nota: Los valores entre paréntesis representan porcentajes; CG = contribución del grupo; PS = proporción poblacional; SL = nivel de vida. Fuente: Encuesta de campo, 2023.

En términos comparativos, la incidencia de pobreza es menor entre los beneficiarios que entre los no beneficiarios: los niveles de pobreza aguda en los grupos de desbordamiento y de control son superiores a los del grupo beneficiario en 33,3% y 24,78%, respectivamente. Esto sugiere que la intervención ha sido efectiva en la reducción de la pobreza entre los beneficiarios.

Además, el hogar promedio en condición de pobreza del grupo beneficiario presenta una privación del 36,64% de los indicadores ponderados, frente al 40,19% y 38,68% de los grupos de desbordamiento

y de control, respectivamente, como se evidencia en su índice de intensidad de pobreza. En resumen, los hogares pobres del grupo beneficiario experimentaron 10,34% de privación del total de posibles privaciones, frente a 24,72% y 20,49% en los grupos de desbordamiento y de control, respectivamente, de acuerdo con su índice de pobreza multidimensional (MPI).

No obstante, según el índice de brecha de pobreza multidimensional (MPG), la brecha promedio específica por indicador entre los que tienen y los que no tienen recursos en el grupo beneficiario fue de

17,87%, frente a 36,79% y 32,49% en los grupos de desbordamiento y de control, respectivamente. En otras palabras, si los hogares pobres de los tres grupos se volvieran más privados en los indicadores críticos, la pobreza aumentaría en 17,87%, 36,79% y

32,49%, respectivamente. De igual manera, si la brecha de privación se redujera, los niveles de pobreza disminuirían en la misma proporción, aun cuando los hogares siguieran siendo pobres.

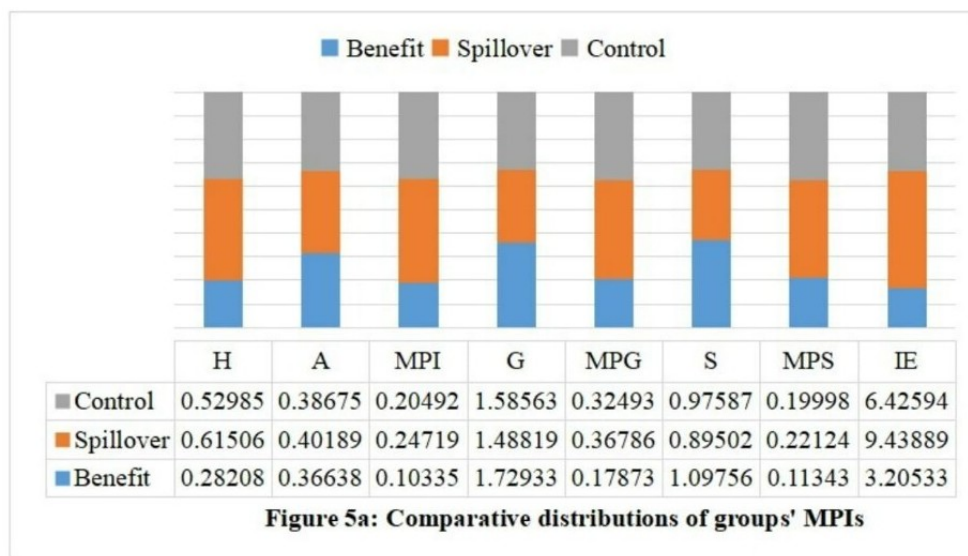


Figura 5a: Distribuciones comparativas de los IPM en los grupos.

Además, la severidad promedio de los indicadores de privación fue de 11,34% para el grupo beneficiario, 22,12% para el de desbordamiento y 20% para el grupo de control, según sus respectivos índices de severidad de pobreza multidimensional (MPS).

En síntesis, la contribución del grupo beneficiario a la pobreza total en el área de estudio es del 17%, frente al 45% y 38% de los grupos de desbordamiento y de control, respectivamente. De igual forma, la proporción de la población pobre del grupo beneficiario es del 30,38%, frente al 34,68% del grupo de desbordamiento y el 34,94% del grupo de control.

Entre los hogares pobres del grupo beneficiario, el estándar de vida ocupa el primer lugar como el indicador más asociado a privación, seguido por el empoderamiento y luego el medio ambiente, según la distribución por dimensiones (Figuras 5b y 5c). En términos comparativos, la contribución de los grupos a la pobreza supera su proporción poblacional pobre (Figura 5d), lo que implica que no

existe una distribución desigual significativa de la pobreza dentro del grupo beneficiario, a diferencia de los grupos de desbordamiento y de control, que presentan una carga desproporcionada de pobreza.

Adicionalmente, la desigualdad en los niveles de pobreza entre los hogares pobres de las poblaciones analizadas fue baja, como lo evidencia el valor del índice de desigualdad. Sin embargo, según Alkire et al. (2016), citados por Sadiq y Bashir (2022) y Sadiq et al. (2024a), un nivel bajo de desigualdad entre los pobres o una reducción en el grado de desigualdad no implica necesariamente una disminución uniforme de la pobreza entre los distintos subgrupos demográficos.

Cabe señalar que no se estableció un caso de pobreza severa ($k = 0,50$) en ninguno de los grupos analizados. En general, puede inferirse que los beneficiarios del NEAZDP presentan niveles más bajos de pobreza multidimensional en comparación con los grupos de desbordamiento y de control, con menor incidencia, intensidad y severidad de la pobreza.

A pesar de estos avances, aún existen desafíos en las dimensiones específicas como el nivel de vida, el empoderamiento y el medio ambiente. El éxito del programa en la reducción de la proporción y severidad de la pobreza demuestra su potencial para seguir mitigando la pobreza si se abordan los

indicadores críticos. Los ajustes de las políticas eficaces podrían potenciar su impacto, reduciendo potencialmente la pobreza en hasta 17,87% entre los beneficiarios. Estos hallazgos destacan el impacto positivo del programa y subrayan las áreas que requieren mejora continua e intervención focalizada.

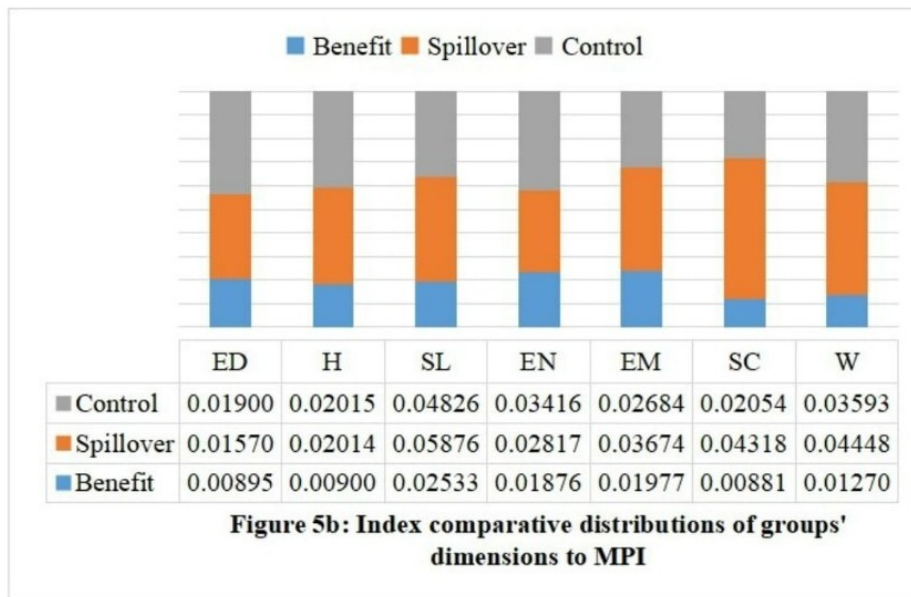


Figura 5b: Índice de distribuciones comparativas de las dimensiones de los grupos al IPM.

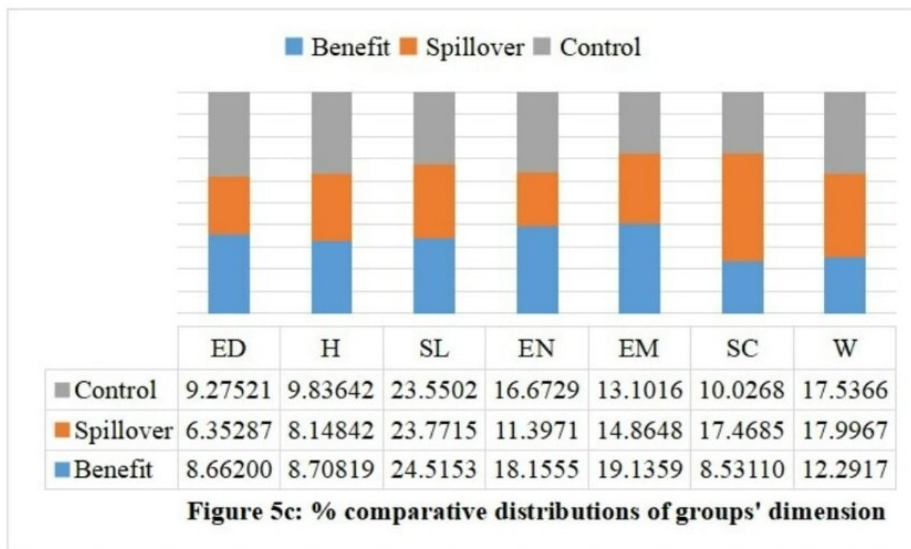


Figura 5c: Distribuciones porcentuales comparativas de las dimensiones de los grupos.

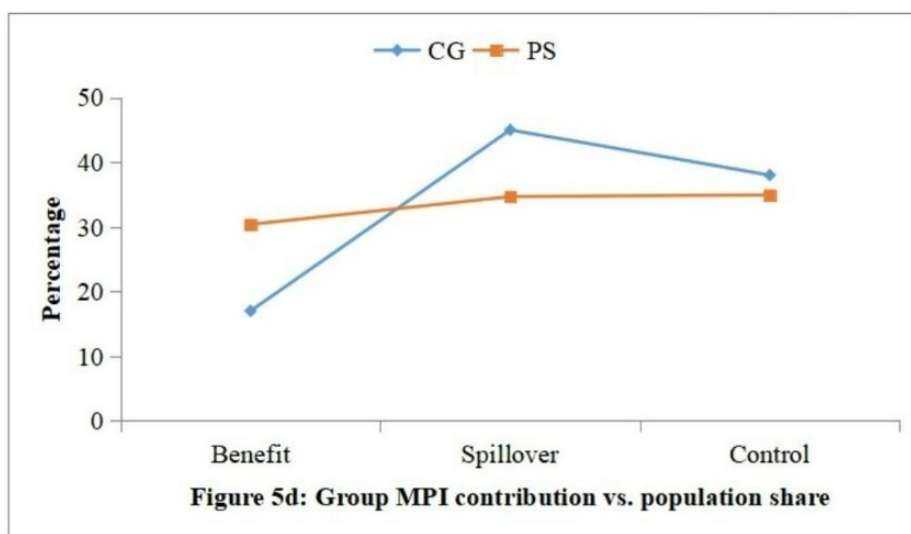


Figura 5d: Contribución del IPM por grupo frente a la cuota de población.

Conclusiones y Recomendaciones

El Programa de Desarrollo de la Zona Árida del Noreste (NEAZDP) ha demostrado una eficacia significativa en la reducción de la pobreza entre los beneficiarios del estado de Yobe. El estudio revela una disminución constante en la proporción de beneficiarios por debajo del umbral de pobreza a lo largo del tiempo, con una mejora notable observada hasta la tercera fase trimestral del programa.

El programa ha logrado reducir la incidencia, la intensidad y la severidad de la pobreza entre sus participantes, especialmente en las dimensiones relacionadas con el nivel de vida, el empoderamiento y el medio ambiente. No obstante, persisten desafíos en dimensiones específicas de la pobreza, lo que subraya la necesidad de intervenciones focalizadas.

Si bien la desigualdad dentro del grupo beneficiario se mantiene baja, existen disparidades evidentes entre beneficiarios y no beneficiarios, lo que enfatiza la importancia de garantizar una distribución equitativa de los recursos y estrategias de crecimiento inclusivo.

En consecuencia, el presente estudio propone las siguientes recomendaciones para fomentar la inclusión y el crecimiento integral entre los beneficiarios en el área de estudio:

Es imperativo que el programa se enfoque en abordar las dimensiones específicas de la pobreza identificadas en el estudio, particularmente mediante la mejora del acceso a una educación de calidad, servicios de salud y medios de vida sostenibles.

El programa debe fortalecer los esfuerzos de conservación ambiental y promover prácticas agrícolas sostenibles, con el fin de garantizar la resiliencia a largo plazo y reducir la vulnerabilidad frente a los riesgos climáticos.

Es necesario implementar mecanismos rigurosos de monitoreo y evaluación para seguir de forma continua los indicadores de reducción de la pobreza y ajustar las estrategias en función de datos actualizados.

Se recomienda integrar las estrategias de reducción de la pobreza con políticas de desarrollo más amplias a nivel local, regional y nacional, asegurando un crecimiento integral e inclusivo, basado en la equidad en la distribución de los recursos.

Finalmente, el programa debería invertir en iniciativas de fortalecimiento de capacidades para empoderar a las comunidades e instituciones locales, de modo que puedan mantener de forma autónoma los esfuerzos de reducción de la pobreza.

Contribución de los autores

M.S.S.: Conceptualización, procesamiento de datos, resultados y discusión (60%). **I.J.G.:** Introducción, metodología, resultados y discusión (40%).

Referencias

- Alkire, S., y Foster, J. (2011). Counting and multi-dimensional poverty measurement. *Journal of Public Economics*, 95(7-8), 476–487. Online: <https://doi.org/10.1016/j.jpubeco.2010.11.006>
- Aristondo, O., y Onaindia, E. (2020). On measuring the sources of changes in poverty using the shapley method. an application to europe. *Fuzzy Sets and Systems*, 383, 80–91. Online: <https://doi.org/10.1016/j.fss.2018.12.011>
- Bárcena-Martín, E., y Cantó, O. (2025). The three i's of downward income mobility: A directional subgroup decomposable measure. *Review of Income and Wealth*, 71(1), e12686. Online: <https://doi.org/10.1111/roiw.12686>
- Bartlett, P. L., Boucheron, S., y Lugosi, G. (2002). Model selection and error estimation. *Machine Learning*, 48, 85–113. Online: <https://doi.org/10.1023/A:1013999503812>
- Bhuiyan, M. A. K., Liu, Z., y Meng, F. (2023). Measurement and difference analysis of multidimensional poverty of floating population. *Kybernetes*, 53(3), 1168–1180. Online: <https://doi.org/10.1108/K-07-2022-0943>
- Blau, P. M., y Duncan, O. D. (1967). *The american occupational structure: With the collaboration of andrea tyree*. J. Wiley.
- Bossert, W., Cato, S., y Kamaga, K. (2022). Generalized poverty-gap orderings. *Social Indicators Research*, 164(1), 189–215. Online: <https://doi.org/10.1007/s11205-022-02950-5>
- Bourguignon, F. (2004). *The poverty-growth-inequality triangle* (Working Paper n.º 125). Indian Council for Research on International Economic Relations.
- Cinjel, N. D., y Kefas, M. (2024). Mwaghavul arable farmers–fulani herdsman conflict and socio-economic development in mangu local government area of plateau state. *NG Journal of Social Development*, 13(1), 78–96. Online: <https://doi.org/10.4314/ngj.v13i1.6>
- Danjuma, M. N., y Daura, U. S. (2014). Towards sustainable mitigation of environmental degradation in nigeria. *Journal of Environment and Earth Science*, 4(21), 93–108.
- Datt, G., y Ravallion, M. (1992). Growth and redistribution components of changes in poverty measures: A decomposition with applications to brazil and india in the 1980s. *Journal of Development Economics*, 38(2), 275–295. Online: [https://doi.org/10.1016/0304-3878\(92\)90001-P](https://doi.org/10.1016/0304-3878(92)90001-P)
- Duclos, J.-Y., y Araar, A. (2006). *Poverty and equity: measurement, policy and estimation with dad* (Vol. 2). Ottawa: IDRC.
- Fatima, N., Said, R., Mazlan, N., y Nor, N. (2024). Dynamics of pro-poor growth: an analysis of distributional pattern of growth in pakistan (2007-2018). *Remittances Review*, 9(1), 3062–3081. Online: <https://doi.org/10.33282/rr.vx9il.133>
- Fosu, A. K., y Gafa, D. W. (2022). Poverty, inequality and governance: a global perspective. En *Handbook on governance and development* (pp. 230–248). Edward Elgar Publishing. Online: [10.4337/9781789908756.00025](https://doi.org/10.4337/9781789908756.00025)
- Gadzama, N. (2017). An opportunity for diaspora participation in environmentally friendly programme for improved livelihoods in north-east sahel of nigeria. *International Journal of Sudan Research*, 7(2), 121–136.
- Galadima, S., y Isa, P. (2020). Value chain analysis of sesame in bade and jakusko local government areas of yobe state, nigeria. *The International Journal of Humanities & Social Studies*, 8(11).
- Ha, T. (2024). The efficacy and efficiency of public transfer programmes on the poverty of the older population in south korea. *International Journal of Social Welfare*, 33(1), 61–74. Online: <https://doi.org/10.1111/ijsw.12582>
- Huppi, M., y Ravallion, M. (1991). The sectoral structure of poverty during an adjustment period: Evidence for indonesia in the mid-1980s. *World Development*, 19(12), 1653–1678. Online: [https://doi.org/10.1016/0305-750X\(91\)90011-6](https://doi.org/10.1016/0305-750X(91)90011-6)

- Jellason, P. N. (2018). *Environmental challenges and linkages to smallholder agriculture in the nigerian drylands: Implications for food security* (Tesis Doctoral no publicada). Coventry University.
- Kabari, J., y Nwogo, O. (2021). Poverty reduction and rural development in nigeria: A study of sustainable development goals (sdgs), 2015-2020. *European Journal of Agricultural and Rural Education*, 2(12), 25–33.
- Kolawole, P., y Samuel, O. (2024). Effect of sustainable development goals and rural development in nigeria: 2000-2021. *African Journal of Management and Business Research*, 15(1), 182–210. Online: <https://doi.org/10.62154/v3wg6a72>
- Lembi, J. J., y Yahaya, A. (2023). Socioeconomic transformation in yobe state. En *Gombe 25: Essays in honour of ibrahim hassan dankwambo*.
- Li, N., y He, M. (2024). Feminization of poverty: an analysis of multidimensional poverty among rural women in china. *Humanities and Social Sciences Communications*, 11(1), 1–19. Online: <https://doi.org/10.1057/s41599-024-03006-4>
- Madaki, M., Owoade, E., Hassan, B., y Muhammed, H. (2024). Assessing climate change perceptions and adaptation strategies among sesame farmers in yobe state, nigeria. *Asian Research Journal of Agriculture*, 17(2), 309–317.
- Mak, J., Odihi, D., Wonodi, C., Ali, D., de Broucker, G., Sriudomporn, S., y Patenaude, B. (2023). Multivariate assessment of vaccine equity in nigeria: A verse tool case study using demographic and health survey 2018. *Vaccine: X*, 14, 100281. Online: <https://doi.org/10.1016/j.jvaxc.2023.100281>
- Marcelino, G., y Cunha, M. (2023). Multidimensional poverty in brazil: evidences for rural and urban areas. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, 62, e266430. Online: <https://doi.org/10.1590/1806-9479.2022.266430en>
- Mukhtar, H., Bababe, F., y Mechanic, M. (2017). Challenges and prospects of rural community water supply by the north-east arid zone development programme (neazdp) in northern yobe state, nigeria. *International Journal of Research in Humanities and Social Studies*, 4(9), 37–48.
- Naibbi, A. I. (2023). *Fuelwood and vegetation change in northern nigeria* (Tesis Doctoral no publicada). University of Portsmouth.
- Ncube, T., Zualii, L., Murray, U., Nguyen, N., Liebig, T., Krendelsberger, A., ... Spillane, C. (2024). Understanding the climate, migration, social protection nexus from a youth mobility dimension: can social protection address the drivers of climigration? *Climate and Development*, 1–22. Online: <https://doi.org/10.1080/17565529.2024.2380380>
- Notestein, F. W. (1945). International population readjustments. *Proceedings of the Academy of Political Science*, 21(2), 94–102.
- Ogbari, M., Folorunso, F., Simon-Ilogho, B., Adebayo, O., Olanrewaju, K., Efegbudu, J., y Omoregbe, M. (2024). Social empowerment and its effect on poverty alleviation for sustainable development among women entrepreneurs in the nigerian agricultural sector. *Sustainability*, 16(6), 2225. Online: <https://doi.org/10.3390/su16062225>
- Ogwang, T., y Mwabu, G. (2024). Adaptation of the foster-greer-thorbecke poverty measures for the measurement of catastrophic health expenditures. *Health Economics*, 33(10), 2419–2436. Online: <https://doi.org/10.1002/hec.4880>
- Orunbon, N., y Adeleke, A. (2024). Getting poverty to zero in nigeria through the lens of social protection programmes. *Educational Perspectives*, 12(2), 105–114.
- Rebechi, A., y Rohde, N. (2023). Poverty and inequality in australia, 2001–2018. En *Research handbook on measuring poverty and deprivation* (pp. 663–672). Edward Elgar Publishing. Online: <https://doi.org/10.4337/9781800883451.00081>
- Rehman, S., Rahman, M., Hameed, G., y Athar, M. (2024). Reflecting the dynamics of pro poor growth in developing economy of pakistan: Evidence of national and sub national level. *Pakistan Research Journal of Social Sciences*, 3(2).
- Sadiq, M., y Grema, I. (2024). Assessment of social welfare progress of neazdp beneficiaries in yobe state of nigeria. *Problems of World Agriculture/Problemy Rolnictwa Światowego*, 24(4), 16–41. Online: <https://doi.org/10.22630/PRS.2024.24.4.14>

- Sadiq, M., Singh, I., y Ahmad, M. (2020). Rice yield differentials between ifad participating and non-participating farmers in nigeria's niger state. *Economic Affairs*, 65(4), 559–573. Online: <https://doi.org/10.46852/0424-2513.4.2020.12>
- Sadiq, S., y Sani, B. (2022). Livelihood status of paddy rice agro-processors that benefitted from microfinance credit in jigawa state of nigeria. *Bozok Journal of Agriculture and Natural Sciences*, 1(2), 71–94.
- Sadiq, S., Singh, I., Ahmad, M., y Bala, M. (2024). Livelihood vulnerability resilience capacity of the rural economy in nigeria's bauchi state. *Alexandria Journal of Agricultural Sciences*, 69(1), 98–122. Online: <https://doi.org/10.21608/alexja.2024.255053.1054>
- Sadiq, S., Singh, I., Ahmad, M., y Moses, G. (2025). Multidimensional poverty status correlates of rural households in kaduna state of nigeria. *International Journal of Public Policy in Egypt*, 4(2), 100–123. Online: <https://doi.org/10.21608/ijppe.2025.423913>
- Salari, A., Zayanderood, M., y Jalae, S. (2024). Analytical study of multidimensional poverty in urban and rural areas. *Geography (Regional Planning)*, 14(54), 1–14.
- Schotte, S. (2023). Poverty, social mobility, and the middle class: evidence from south africa. En *Research handbook on poverty and inequality* (pp. 186–204). Edward Elgar Publishing. Online: <https://doi.org/10.4337/9781800882300.00018>
- Sen, A. (1999). *Development as freedom*. Oxford: Oxford University Press.
- Septya, M., Kamarni, N., y Devianto, D. (2024). A portrait of multidimensional poverty of indonesian agricultural households. *Daengku: Journal of Humanities and Social Sciences Innovation*, 4(4), 638–646. Online: <https://doi.org/10.35877/454RI.daengku2541>
- Seth, S., y Alkire, S. (2014). *Did poverty reduction reach the poorest of the poor? assessment methods in the counting approach* (OPHI Working Paper n.º 77). Queen Elizabeth House, University of Oxford.
- Tigre, G. (2020). Multidimensional inequality in ethiopia. En *A multidimensional economic assessment of africa* (pp. 87–113). Springer. Online: https://doi.org/10.1007/978-981-15-4510-8_5
- Umar, M. B. (2024). Climate change awareness, perception, and adaptation strategies for small and marginal farmers in yobe state, nigeria. En *Sustainability of natural resources* (pp. 148–163). CRC Press. Online: <https://doi.org/10.1201/9781003303237-9>
- Urban, I., Bezeredi, S., y Leventi, C. (2024). Decompositions of inequality and poverty by income source. *The BE Journal of Economic Analysis & Policy*, 24(3), 1017–1027. Online: <https://doi.org/10.1515/bejeap-2024-0004>
- Woode, G. (2024). Distributional impact of africa continental free trade area (afcfra) on poverty reduction & employment in sub-saharan africa. SSRN. Online: <https://doi.org/10.2139/ssrn.4830742> (Available at SSRN 4830742)
- Wrona, A., De Santis, E., Priscoli, F. D., y Lavacca, F. G. (2023). An intelligent ground station selection algorithm in satellite optical communications via deep learning. En *2023 31st mediterranean conference on control and automation (med)* (pp. 493–499).
- Wudil, A., Usman, M., Rosak-Szyrocka, J., Pilař, L., y Boye, M. (2022). Reversing years for global food security: A review of the food security situation in sub-saharan africa (ssa). *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(22), 14836. Online: <https://doi.org/10.3390/ijerph192214836>

Apéndice

Apéndice 1: Dimensiones, indicadores, umbrales de privación y peso relativo (RW) del IPM.

Dimensión	Indicador	Umbral de privación	Peso (RW)
Educación	Escuela	Ningún niño (≥ 10 años) ha completado cinco años de escolaridad.	1/28
	Escuela	Ningún niño en edad escolar (1–6 años) asiste a la escuela.	1/28
	Alfabetización	El jefe principal del hogar no posee educación formal.	1/28
	Alfabetización	El jefe secundario del hogar no posee educación formal.	1/28
Salud	Nutrición	Algún miembro de la familia presenta bajo peso (IMC $< 18,5$) o sobrepeso (≥ 23) / obesidad (≥ 25).	1/28
	Vacunación	Algún miembro de la familia no ha sido inmunizado/vacunado contra enfermedades transmisibles.	1/28
	Atención prenatal	Alguna mujer embarazada en el hogar tuvo menos de cuatro (4) controles prenatales.	1/28
	Morbilidad	Algún miembro del hogar estuvo enfermo en los cinco meses previos a la encuesta.	1/28
Nivel de vida	Vivienda	El hogar vive en condiciones habitacionales inadecuadas.	1/63
	Seguros	Ningún miembro de la familia está afiliado a algún tipo de seguro de salud.	1/63
	Electricidad	No tiene acceso a electricidad.	1/63
	Agua	No tiene acceso a agua potable segura.	1/63
	Movilidad	No posee ningún tipo de vehículo para transporte.	1/63
	Institución financiera	No posee cuenta de ahorros en un banco.	1/63
	Terreno residencial	No posee al menos 100 m ² de terreno residencial distinto al lugar donde reside.	1/63
	Seguridad alimentaria	El hogar está por debajo del umbral de seguridad alimentaria (2/3 del gasto en alimentos).	1/63
	Sobrepoblación	El hogar se encuentra en condición de hacinamiento.	1/63
	Empoderamiento	Decisión sanitaria	No puede tomar decisiones sobre su propia atención médica.
Violencia doméstica		No puede prevenir la violencia doméstica.	1/63
Inestabilidad		Presencia de problemas de agitación social o política.	1/63
Autodefensa		Problemas de seguridad personal.	1/63
Empleo		No puede tomar decisiones de empleo propias distintas de las actividades agrícolas.	1/63
Diversificación		No participa en actividades no agrícolas.	1/63
Crédito		No tiene acceso a servicios de crédito durante la última temporada productiva antes de la encuesta.	1/63
Asociaciones		No pertenece a ninguna organización cooperativa.	1/63
Servicios de asesoramiento		No tuvo acceso a servicios de extensión agrícola durante la última temporada productiva antes de la encuesta.	1/63
Medio ambiente		Saneamiento	El hogar aún practica la defecación al aire libre.
	Energía	Utiliza combustibles contaminantes como fuente principal de energía para cocinar (ej. leña, estiércol o carbón).	1/14
Conexión social	Servicios de asesoría	El jefe del hogar no ha participado en ningún tipo de actividad a nivel comunitario.	1/21
	Servicio comunitario	No tuvo acceso a servicios de extensión agrícola durante la última temporada productiva antes de la encuesta.	1/21

Continúa en la siguiente página...

Continuación del Apéndice

Dimensión	Indicador	Umbral de privación	Peso (RW)
	Responsabilidad cooperativa	El hogar no ha estado involucrado en la organización de actividades a nivel comunitario.	1/21
	Red de seguridad social	No confía en los programas de inversión social del gobierno (ej. <i>farmers/traders monie</i> , entre otros).	1/21
Riqueza	Terrenos agrícolas	El hogar no posee ninguna tierra agrícola.	1/28
	Ganadería	Propiedad de ganado (se considera en privación si las unidades de ganado tropical —TLU— están por debajo del promedio).	1/28
	Exist. Muertas (Agric.)	No posee bienes agrícolas duraderos.	1/28
	Exist. Muertas (No Agric.)	No posee existencias muertas no agrícolas.	1/28

Fuente: Modificado de (Sadiq y Sani, 2022; Sadiq y Grema, 2024; Sadiq y cols., 2024).



CONSTRUCCIÓN DE UN INSTRUMENTO BASADO EN EL MODELO EGCI PARA MEDIR PRÁCTICAS SOSTENIBLES DE USO DEL AGUA EN LA CIUDADANÍA

DEVELOPMENT OF AN INSTRUMENT BASED ON THE EGCI MODEL TO MEASURE SUSTAINABLE WATER USE PRACTICES AMONG CITIZENS

Jessica Müller-Pérez ^{*1}, Angel Acevedo-Duque ², Montserrat
Sánchez-Espinosa ¹, Irma Verges ² y Rina María Álvarez-Becerra ³

¹CONCYTEP-Universidad Popular Autónoma de Puebla. Código Postal 72410, Puebla, México. [<https://ror.org/00njxm476>]

²Universidad Autónoma de Chile, Código Postal 7500912, Santiago, Chile. [<https://ror.org/010r9dy59>]

³Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna 23001, Perú. [<https://ror.org/0087jna26>]

*Autor para correspondencia: jessica.muller@upaep.mx

Manuscrito recibido el 11 de abril de 2025. Aceptado, tras revisión el 09 de diciembre de 2025. Publicado el 1 de marzo de 2026.

Resumen

En la actualidad, las conductas de conservación del agua en el ámbito residencial son esenciales para prevenir la creciente escasez global del recurso hídrico. Este estudio tiene como objetivo analizar los factores que influyen en la intención de la ciudadanía de adoptar prácticas sostenibles de cuidado del agua, integrando las variables del modelo EGCI bajo una perspectiva de consumo responsable. Para ello, se aplicó una encuesta en línea a 450 personas en México, uno de los países que enfrenta una crisis hídrica severa. El instrumento fue diseñado específicamente para este estudio, considerando variables relevantes asociadas al acrónimo EGCI (Economía del consumo, Gestión sostenible del agua, Compromiso moral, Intención de prácticas sostenibles). Los datos fueron analizados mediante modelos de ecuaciones estructurales con mínimos cuadrados parciales (PLS-SEM). Los resultados evidencian que el compromiso moral influye de manera directa y positiva tanto en la gestión sostenible del agua como en la intención de implementar prácticas responsables. Asimismo, se comprobó que la percepción de reducción de costos asociados al consumo hídrico incide positivamente en una gestión más eficiente. Estos hallazgos subrayan la necesidad de continuar promoviendo la educación ciudadana en torno al ahorro responsable y la gestión sostenible del agua, además de diseñar campañas segmentadas que transformen patrones de consumo y fomenten el uso de tecnologías orientadas a minimizar el desperdicio y mejorar la eficiencia en el uso del recurso.

Palabras clave: Economía del consumo, gestión sostenible del agua, compromiso moral, intención de prácticas sostenibles.

Abstract

At present, residential water conservation behaviors are essential to prevent the growing global scarcity of water resources. This study aims to analyze the factors that influence citizens' intention to adopt sustainable water care practices, integrating the variables of the EGCI model under a responsible consumption perspective. To this end, an online survey was conducted with 450 participants in Mexico, one of the countries facing a severe water crisis. The instrument was specifically designed for this study, taking into account relevant variables associated with the EGCI acronym (Economic consumption, Sustainable water management, Moral commitment, and Intention to adopt sustainable practices). Data were analyzed using Partial Least Squares Structural Equation Modeling (PLS-SEM). The results show that moral commitment has a direct and positive influence on both sustainable water management and the intention to implement responsible practices. Likewise, it was confirmed that the perception of reduced costs associated with water consumption has a direct and positive impact on more efficient water management. These findings highlight the importance of continuing to educate citizens not only about responsible water savings but also about offering alternatives for the sustainable management of this resource. Furthermore, they support the design of targeted campaigns aimed at different sectors of society to modify consumption patterns, as well as the use of technological tools to reduce waste and improve water-use efficiency.

Keywords: Consumer economics, sustainable water management, moral commitment, intention to adopt sustainable practices.

Forma sugerida de citar: Müller-Pérez, et al. (2026). Construcción de un instrumento basado en el modelo EGCI para medir prácticas sostenibles de uso del agua en la ciudadanía. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*. Vol. 43(1):67-78. <https://doi.org/10.17163/lgr.n43.2026.03>.

Orcid IDs:

Jessica Müller-Pérez : <https://orcid.org/0000-0002-3212-9357>
Angel Acevedo-Duque : <https://orcid.org/0000-0002-8774-3282>
Montserrat Sánchez Espinosa : <https://orcid.org/0000-0001-5008-9857>
Irma Yomara Verges : <https://orcid.org/0009-0003-0554-9959>
Rina María Álvarez-Becerra : <https://orcid.org/0000-0002-5455-6632>

1 Introducción

Es bien sabido que el “Día 0” se asocia con un futuro en el que la escasez de agua será irreversible, aunque la realidad es que dicho escenario ya está alcanzando a diversas regiones de la República Mexicana (Coparmex, 2024). Lo anterior, debido a una serie de factores entre los cuales se pueden mencionar el cambio climático, la mala planificación metropolitana (Gómez, 2024) y el uso inadecuado de los recursos por parte de la población (Gaspar-Santos y cols., 2024).

Es por ello que la presente investigación se enfoca en el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 6, “Agua limpia y saneamiento”, el cual garantiza el acceso al agua potable y su gestión sostenible; ya que se estima que para el 2030 miles de millones de personas no tendrán acceso a dicho recurso, a menos que se eduque a la población en cuanto al uso eficiente del preciado recurso hídrico, así como en aumentar la inversión en infraestructuras e instalaciones de saneamiento y protección del agua (Organización de las Naciones Unidas, 2020).

Además, el problema de escasez del agua no solo es de interés nacional sino internacional, debido a que el acceso al vital líquido es un desafío porque en ocasiones el agua está contaminada por los altos niveles de salinidad, nitrato y cloruro (AlHaddid y cols., 2024; Salem y Ertz, 2023). En efecto, en 2023 la escasez de agua impactó a más de 2000 millones de personas en el mundo y se espera que dicho número se incremente en los siguientes años provocando inseguridad alimentaria, la extinción de algunas especies, sequías que amenazan a la vida humana y conflictos entre gobiernos por el recurso hídrico (Nasiri y cols., 2024).

De acuerdo con la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), el estado de Puebla ocupó el segundo lugar a nivel nacional con mayor sequía en 2024, debido a que no se tuvo la precipitación pluvial adecuada para abastecer el territorio (Milenio, 2024). En efecto, se recomendó a la población reciclar el agua para regar las plantas, lavar el automóvil o para el sanitario; además, se concientizó a los ciudadanos de evitar tirar basura en las calles con el fin de no tapar drenajes ni coladeras.

Es importante mencionar que, debido a la creciente escasez del agua, se ha incitado a buscar soluciones innovadoras y sostenibles para la gestión del agua en Puebla; por ejemplo, el uso de aguas grises en casa-habitación ha sido propuesto como una estrategia para la disminución del consumo de agua, así como modificaciones en la plomería existente y la instalación de un tanque de almacenamiento subterráneo (Reynoso Castro y Díaz Barrientos, 2024). Además, el derecho al agua es indispensable, aun cuando el cambio climático ha provocado alteraciones extremas en las condiciones climáticas, que han afectado de manera directa la disponibilidad de agua dulce; por ejemplo, el aumento en la temperatura provoca sequías intensas en algunas regiones al evaporar el líquido de los cuerpos de agua superficiales, por lo que la participación de la ciudadanía y de los gobiernos es necesaria para evitar la escasez del vital líquido (Rodríguez García, 2024).

De acuerdo con Gaspar-Santos y cols. (2024), la correcta gestión sostenible del agua es crucial para proteger el medio ambiente y asegurar la provisión del recurso hídrico a las futuras generaciones. Es por lo anterior que el objetivo del presente estudio es analizar los factores que influyen en la intención de la ciudadanía de adoptar prácticas sostenibles de cuidado del agua, integrando las variables del modelo EGCI bajo una perspectiva de consumo responsable. Los resultados del estudio identifican oportunidades para mejorar la eficiencia en el uso del agua, así como ser referente en modelos predictivos del comportamiento de la población en el uso sostenible de los recursos naturales.

2 Marco teórico

En la literatura previa se ha mencionado que el comportamiento para pronosticar el consumo de agua por parte de la población no depende únicamente de factores externos, tales como el precio, la distribución o la disponibilidad de información sobre las medidas de ahorro de agua, entre otras; sino también de las condiciones personales y las fuerzas motivacionales del individuo que toma las decisiones (Cary, 2008; Pino y cols., 2017). Es por ello que, para fines de la presente investigación, se consideran las variables estudiadas en temas de cuidado del agua, como economía del consumo y gestión sostenible del agua (Chenoweth y cols., 2016; Lowe y

cols., 2015; Salem y Ertz, 2023), así como las variables de conciencia ambiental y compromiso moral, las cuales han sido abordadas en temas de cuidado del medio ambiente (Imani y cols., 2021; Keles y cols., 2023; Rusyani y cols., 2021) y, finalmente, la variable de intención de adoptar prácticas sostenibles en el cuidado del agua (Fatoki, 2022; Lowe y cols., 2015; Mitev y cols., 2024; Salem y Ertz, 2023).

2.1 Gestión sostenible del agua para una responsabilidad social

De acuerdo con Chenoweth y cols. (2016), hacer buen uso del agua es primordial para disminuir la presión sobre las fuentes de agua y el medio ambiente. En efecto, la gestión eficaz del vital líquido es una prioridad para muchos países en todo el mundo, debido a los procesos de industrialización y urbanización, los cuales provocan el consumo excesivo y no planificado de agua (Pino y cols., 2017).

Por su parte, Mitev y cols. (2024) mencionan que reducir la demanda de agua de los hogares es una parte esencial de la reducción del consumo general de agua en ciudades grandes. En efecto, el gobierno, los inversores, el público y las fuerzas del mercado como los consumidores son las fuerzas impulsoras que favorecen el ahorro del agua (Zhang y cols., 2025). Por ejemplo, las empresas que suministran el agua proporcionan información a los usuarios de cómo mejorar el consumo y ahorro de agua a través de los diferentes medios de comunicación (Tian y Chen, 2022).

No obstante, Beal y cols. (2013) y Tian y Chen (2022) plantean que, aun cuando las familias conocen las formas de gestionar el agua y están conscientes del problema de escasez, sus comportamientos de ahorro de agua no son los más efectivos, impactando negativamente en la responsabilidad social.

2.2 Intención de adoptar prácticas sostenibles

En cuanto a la intención de las personas de ahorrar agua, la mitigación del cambio climático y la construcción de resiliencia demandan un enfoque multidimensional que combine la modificación de hábitos personales, como la reducción del tiempo de aseo y la recolección de agua de lluvia, con la adopción de infraestructura eficiente mediante el

uso de productos ahorradores (Mitev y cols., 2024; Muenratch y Nguyen, 2023; Guo y cols., 2022; Djayasinga, 2021). Además, la intención de adoptar prácticas sostenibles puede manifestarse en una variedad de áreas, como el consumo responsable, la movilidad sostenible, la gestión de residuos, la conservación de recursos naturales (Lowe y cols., 2015) y el ahorro de energía eléctrica (Fatoki, 2022).

De acuerdo con Truong (2024), la intención de las personas es la disposición de estas para comprar o adoptar productos de acuerdo con las experiencias personales, basándose en aspectos internos (emociones) o externos (relación costo-beneficio). En ese mismo sentido, AlHaddid y cols. (2024) mencionan que es necesario adoptar prácticas sostenibles relacionadas con el agua a nivel doméstico, lo cual radica en la brecha de intención-comportamiento; en otras palabras, la diferencia entre prácticas observadas o deseadas y las prácticas reales en el nivel doméstico.

2.3 La economía del consumo y la gestión sostenible del agua

En el ámbito de la economía del agua, Mitev y cols. (2024) y Muenratch y Nguyen (2023) sostienen que el ahorro del recurso es fundamental para mitigar el cambio climático y fortalecer la resiliencia de los sistemas de abastecimiento. No obstante, advierten que la efectividad de estas estrategias enfrenta la barrera de los hábitos de consumo excesivo, los cuales están tan arraigados que dificultan la adopción de nuevas conductas de ahorro, tales como la reutilización del agua gris, la recolección de agua de lluvia, disminuir el tiempo en la regadera o el uso de aparatos ahorradores de agua, entre otros.

En efecto, Tijs y cols. (2017) mencionan que, para promover un comportamiento proambiental, es necesario proporcionar información sobre los costos ambientales del consumo de energía, agua y gasolina, entre otros. Por ejemplo, Otaki y cols. (2024) comprobaron que, al aplicar descuentos a los hogares de bajo consumo como incentivo por la conservación del agua, se logró una reducción en su uso, pero no tuvieron un efecto perceptible en los hogares de alto consumo, ya que los de bajo consumo de agua deseaban mantener bajas sus facturas. Previamente, de Koning y cols. (2016) expusieron que la población de clase media en Vietnam era motivada

a adoptar actividades a favor del medio ambiente por cuestiones de salud y, sobre todo, por el ahorro de dinero.

Resulta oportuno mencionar que son pocos los estudios que contrastan la eficacia de los llamamientos monetarios frente a los ambientales para reducir el uso del agua (Fielding y cols., 2013; Tijs y cols., 2017).

2.4 El compromiso moral en la gestión sostenible del agua y la intención

De acuerdo con Imani y cols. (2021), el compromiso moral es una de las variables que afectan de mane-

ra directa la intención de las personas de adoptar prácticas más sustentables. En efecto, Menatizadeh y cols. (2024) demostraron que el compromiso moral es una variable que refuerza la intención de los agricultores en prácticas que lleven a la conservación de los recursos hídricos. Asimismo, Yayla y cols. (2020) probaron que los empleados de hoteles ecológicos tenían un mayor compromiso moral para realizar actividades a favor del medio ambiente.

No obstante, Almulhim y Abubakar (2024) destacaron que las personas de Arabia Saudita no sienten que sea un compromiso conservar el agua debido a que lo relacionan con características socioeconómicas.

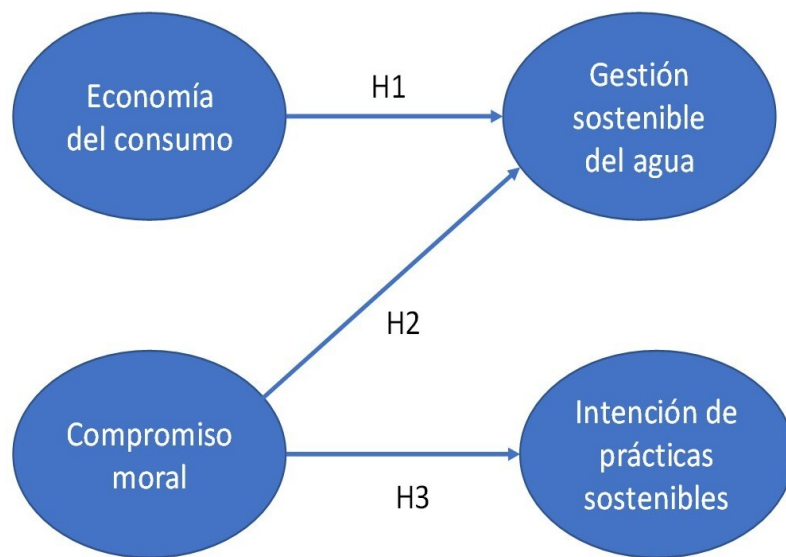


Figura 1. Modelo de Estudio basado en Chenoweth y cols. (2016), Lowe y cols. (2015), Salem y Ertz (2023), Imani y cols. (2021), Keles y cols. (2023) y Rusyani y cols. (2021).

3 Materiales y Métodos

3.1 Muestra y técnica de muestreo

La presente investigación se llevó a cabo en la ciudad de Puebla, México, la cual es la quinta ciudad más poblada de México. La muestra se calculó al aplicar la fórmula para muestra infinita (más de 500 mil elementos) (Pelayo y Arroyo, 2015), dando como resultado 385 elementos; sin embargo, se obtuvieron 450 encuestas. En efecto, la muestra se conformó por ciudadanos de esta localidad (Balbin-Romero y cols., 2024; Zhang y cols., 2025), a los

cuales se les invitó a contestar la encuesta en línea. Para lo anterior, se aplicó una técnica de muestreo no probabilístico y de conveniencia, ya que dicha técnica permite ahorrar recursos y tiempo, además brinda respuestas originales (Jabeen y cols., 2023; Keles y cols., 2023).

Previamente a la aplicación del estudio, el instrumento fue sometido a un proceso de validación por juicio de expertos. Cinco especialistas, tanto nacionales como internacionales, evaluaron la pertinencia, claridad y coherencia de los ítems en rela-

ción con las variables del modelo EGCI (Economía del consumo, Gestión sostenible del agua, Compromiso moral e Intención de prácticas sostenibles) (ver Figura 1). Posteriormente, se aplicó una encuesta piloto a 90 personas con el propósito de verificar la comprensión y redacción de las preguntas, así como su capacidad para medir adecuadamente cada constructo. Los resultados de la prueba piloto permitieron confirmar la validez aparente y de contenido del instrumento, realizándose ajustes menores en la redacción para mejorar su precisión. Finalmente, la aplicación de la encuesta definitiva se llevó a cabo entre los meses de enero y marzo de 2025.

3.2 Instrumento

El cuestionario que se aplicó está dividido en tres partes. En la primera parte se les preguntó los hábitos actuales en cuanto al uso del agua en sus casas (Molina y cols., 2018; Rivera-Pérez y cols., 2020; Zulqarnain y Khan, 2024). En la segunda parte del cuestionario se midieron las variables del modelo de estudio aplicando la escala tipo Likert de 5 puntos, en donde 1 = totalmente en desacuerdo y 5 = totalmente de acuerdo. Y, en la tercera parte, se recabaron datos demográficos de los participantes.

En lo que respecta a la medición de la variable economía del consumo, los ítems se basaron en Lowe y cols. (2015), Salem y Ertz (2023) y Chenoweth y cols. (2016). En lo que respecta a compromiso moral, en Lowe y cols. (2015), Salem y Ertz (2023) y Chen (2020). Para gestión sostenible del agua, en Chenoweth y cols. (2016) y en Molina y cols. (2018). Finalmente, para la variable de intención de adoptar prácticas sustentables en Lowe y cols. (2015), Salem y Ertz (2023) y Chenoweth y cols. (2016).

En relación con este último, se generan los ítems para comprobar las siguientes hipótesis:

- H1:** Una reducción de los costos asociados al consumo de agua en los hogares conducirá a realizar prácticas de gestión sostenible del agua.
- H2:** Un alto nivel de compromiso moral hacia la protección del medio ambiente es un predictor determinante de la gestión sostenible del agua en el ámbito doméstico/ciudadano.

H3: Un alto nivel de compromiso moral hacia la protección del medio ambiente influye de manera positiva y significativa en la intención de adoptar prácticas sostenibles de cuidado del agua.

3.3 Método de análisis de datos

Para el análisis de datos demográficos se utilizó el software SPSS versión 25. En cuanto al análisis del modelo de estudio, se aplicó la técnica de modelo de ecuaciones estructurales de mínimos cuadrados parciales (PLS-SEM) en SmartPLS 4. Una de las ventajas del uso de PLS-SEM es que no requiere ninguna restricción particular de normalidad de los datos y, además, es aplicable al análisis de conjuntos de datos relativamente limitados (Hair Jr. y cols., 2019). Asimismo, el uso del PLS-SEM pronostica los efectos de las variables independientes sobre las variables dependientes (Thanki y cols., 2022).

4 Resultados y Discusión

4.1 Perfil demográfico de los encuestados

En cuanto a la edad de los encuestados, el 70.3% están entre 18 y 23 años, el 10.5% de 24 a 29, el 0.8% de 30 a 35, el 2.3% de 36 a 41, el 2.3% de 42 a 47, el 4.5% de 48 a 53 y el 1.5% es mayor de 53. En lo que respecta al sexo, el 59% son mujeres y el 39.1% son hombres. En cuanto al nivel educativo, el 84.2% son estudiantes de licenciatura, el 5.3% estudian una maestría, el 1.1% son alumnos de doctorado y el 1.5% estudian alguna especialidad.

4.2 Análisis de confiabilidad y validez

En cuanto a la confiabilidad y validez de los constructos en el modelo conceptual, estos se realizaron a través de lo recomendado por Hair Jr. y cols. (2019). En cuanto a la validez convergente, esta se probó con las cargas factoriales ($> 0,70$), la varianza promedio explicada (AVE $> 0,50$), alfa de Cronbach ($> 0,70$) y confiabilidad compuesta. En la Tabla 1 se observa que los constructos tienen validez convergente; no obstante, la variable GSA3 no obtuvo la carga factorial permitida, por lo que se eliminó y se realizó nuevamente el análisis.

Tabla 1. Resultados de Confiabilidad y Validez del modelo.

Constructo / Ítems	Carga Factorial	Alfa de Cronbach	CR	AVE
Economía del consumo				
ECON1	0,723	0,835	0,846	0,671
ECON2	0,819			
ECON3	0,828			
ECON4	0,896			
Compromiso moral				
COM_M1	0,934	0,960	0,963	0,892
COM_M2	0,914			
COM_M3	0,967			
COM_M4	0,963			
Gestión sostenible del agua				
GSA1	0,931	0,854	0,895	0,773
GSA2	0,792			
GSA4	0,909			
Intención de prácticas sostenibles				
INT1	0,732	0,823	0,858	0,650
INT2	0,847			
INT3	0,847			
INT4	0,793			

Nota: CR = Confiabilidad Compuesta; AVE = Varianza Promedio Extraída.

En cuanto a la validez discriminante, Henseler y cols. (2015) describieron el criterio Heterotrait-Monotrait (HTMT) para la validez discriminante con el valor de corte de 0.90; por lo tanto, se indica validez discriminante en la Tabla 2, en donde los valores diagonales son la raíz cuadrada de la AVE. Además, se midieron los valores de los factores de

inflación de la varianza (VIF) para detectar problemas de multicolinealidad, ya que, de acuerdo con Kock (2015), los valores deben ser inferiores a 5 para que las variables empleadas en este estudio se consideren exentas de problemas de multicolinealidad. En la Tabla 3 se observa que en cada constructo se cumplen los criterios establecidos.

Tabla 2. Criterio Heterotrait-Monotrait

	COM_M	ECON	GS	INT
COM_M				
ECON	0,823			
GS	0,826	0,872		
INT	0,483	0,679	0,690	

Tabla 3. Resultados de prueba de hipótesis

Hipótesis	VIF	Path	p-valor	f ²	Resultado
ECON → GSA	2,266	0,413	0,000	0,228	No se rechaza
COM_M → GSA	2,266	0,461	0,000	0,283	No se rechaza
COM_M → INT	1,000	0,447	0,000	0,250	No se rechaza

4.3 Evaluación del modelo estructural

Después de confirmar la validez del modelo de medición, se probó el poder explicativo (R^2) y la relevancia predictiva (Q^2) del modelo. La evaluación

del modelo estructural se realizó aplicando el algoritmo *bootstrapping* PLS con resultado completo, con una submuestra de 5000 y una prueba *t* de una cola, con un nivel de significancia de 0.05 (Hair Jr. y cols., 2019), como se puede observar en la Figura 2.

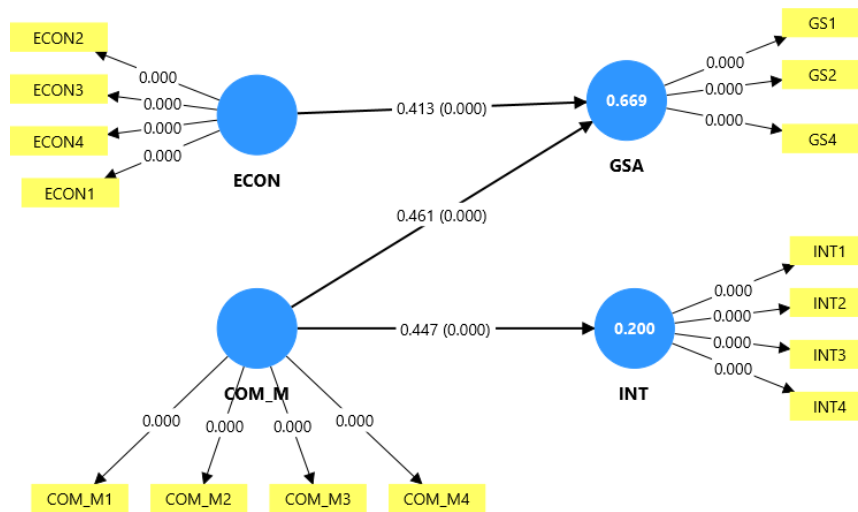


Figura 2. Resultados de la evaluación del modelo estructural.

Con base en los resultados obtenidos, la variable que más impacta en la gestión sostenible del agua fue el compromiso moral ($\beta = 0,461$, $p < 0,001$), por lo que la hipótesis 1 no se rechaza. Seguido de la variable de economía del consumo ($\beta = 0,413$, $p < 0,001$), por lo que no se rechaza la hipótesis 2. Finalmente, la variable compromiso moral afecta de manera positiva y directa en la intención de adoptar prácticas sostenibles ($\beta = 0,447$, $p < 0,001$), por lo que no se rechaza la hipótesis 3.

Se examinó el coeficiente de determinación (R^2) de las variables economía del consumo y compromiso moral en la gestión sostenible del agua, así como en la variable de compromiso moral en la intención de prácticas sostenibles. El R^2 obtenido fue de 0.669, siendo moderado a alto para explicar la variación en la gestión sostenible del agua según la variable de economía del consumo y compromiso moral. Por su parte, el R^2 obtenido para explicar la variación en la intención de adoptar prácticas sostenibles en el cuidado del agua fue de 0.200 (débil).

Finalmente, se analizó la relevancia predictiva Q^2 de Stone-Geisser. Este es un indicador de poder predictivo fuera de muestra; un valor mayor que 0 para una variable endógena específica indica la relevancia predictiva del modelo para un constructo dependiente (Hair Jr. y cols., 2019). En este caso, el constructo de gestión sostenible tiene un $Q^2 = 0,640$ y el de intención un $Q^2 = 0,183$.

4.4 Discusión

Como se pudo observar en los resultados, es necesario proporcionar información sobre los costos ambientales del consumo del agua, así como en los costos monetarios del usuario, tal y como lo mencionan Tijs y cols. (2017), concientizando a las personas de ahorrar agua cuando pasan tiempo en la ducha o cuando dejan correr el agua mientras lavan los trastes. Además de aplicar descuentos a hogares de bajo consumo por conservación de agua para reducir su consumo y sus gastos monetarios al mismo tiempo (Otaki y cols., 2024). Es por lo anterior que no se rechazó la hipótesis 1.

En cuanto a la variable de compromiso moral, fue la que más impactó de manera directa y positiva a la gestión sostenible del agua, por lo que no se rechazó la hipótesis 2. Dichos resultados confirman lo expuesto por Imani y cols. (2021), en donde comprobaron que la conciencia moral es una variable predictora en actividades del cuidado del medio ambiente. Asimismo, Müller-Pérez y cols. (2022) señalaron que el ciudadano mexicano es consciente sobre los problemas ambientales y, por lo tanto, se siente obligado moralmente a adoptar conductas a favor del medio ambiente.

Finalmente, el compromiso moral afectó de manera positiva y directa en la intención de adoptar prácticas sustentables para el cuidado del agua, por lo que la hipótesis 3 no se rechazó. Algunos estudios previos han comprobado que es importante consi-

derar dicha variable para estudios de cuidado del medio ambiente (Müller-Pérez y cols., 2022; Yayla y cols., 2020), debido a que los ciudadanos, al presentar un mayor compromiso moral, tienen una mayor motivación para realizar actividades a favor del medio ambiente. Es por eso que se debe comprometer a las futuras generaciones a mejorar la eficiencia del uso del agua, así como concientizar a la gente sobre la conservación y uso sostenible de los recursos hídricos.

5 Conclusiones

El presente estudio se centró en analizar los factores que influyen en la intención de la ciudadanía de adoptar prácticas sostenibles de cuidado del agua, integrando las variables del modelo EGCI bajo una perspectiva de consumo responsable. Entre los resultados más innovadores se evidencia que el compromiso moral no solo influye de manera directa y significativa en la intención de comportamiento sostenible, sino que también tiene un impacto positivo en la gestión eficiente del agua, un hallazgo que subraya la dimensión ética como motor clave en la conservación hídrica por parte de los estudiantes en Puebla.

Adicionalmente, la confirmación del efecto positivo de la percepción de reducción de costos asociados al consumo de agua en la gestión sostenible aporta una perspectiva económica concreta que fortalece la comprensión de los motivadores del comportamiento ciudadano. Estos resultados ponen de relieve la necesidad de integrar enfoques multidimensionales —que combinan factores morales y económicos— en el diseño de políticas y campañas educativas. Finalmente, el instrumento validado representa una herramienta valiosa y pionera para futuras investigaciones relacionadas con el cuidado del agua.

5.1 Implicaciones teóricas y prácticas

En cuanto a las implicaciones teóricas, el estudio puede ser utilizado como base para futuros estudios enfocados en el cuidado del agua, de la electricidad y gas, entre otros. Además, proporciona una guía para extenderse en modelos de estudio económico y de consumo responsable en teorías de sustentabilidad y economía circular. No obstante,

son necesarios otros estudios que combinen economía, ecología y políticas públicas para abordar el problema del agua desde una perspectiva integral.

En lo que respecta a las implicaciones prácticas, los resultados evidencian la necesidad de diseñar campañas dirigidas a distintos sectores de la sociedad para modificar patrones de consumo a través de estrategias que fomenten el uso de aparatos ahorradores de agua en los hogares, así como dar a conocer a la ciudadanía las diferentes formas en que se puede reutilizar el agua. De la misma forma, estimular a las compañías proveedoras del vital líquido a implementar tarifas dinámicas o subsidios para fomentar el consumo eficiente del agua entre los ciudadanos; por ejemplo, implementar descuentos por pagos anticipados de manera semestral o anual y, a su vez, ofrecer aparatos ahorradores de agua con cargo mensual en sus recibos.

5.2 Futuras líneas de investigación

En cuanto a futuras líneas de investigación en el cuidado del agua, se pueden considerar estudios en donde se evalúe cómo la tecnología (IoT, inteligencia artificial) puede mejorar la eficiencia del uso del agua. De igual manera, estudios de comportamientos de los ciudadanos enfocados en estrategias para el reciclaje y reúso del agua en diferentes sectores, tales como en la industria automotriz. Finalmente, estudios comparativos de comportamiento sustentable del agua en otros estados de la República Mexicana y en otros países.

Agradecimientos

Agradecimiento a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación del Estado de Puebla por el financiamiento a la investigación y a la Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla y la Universidad Autónoma de Chile por el acompañamiento institucional.

Contribución de los Autores

J.M.P.: Conceptualización, Análisis formal, Curación de datos, Administración del proyecto, Investigación, Metodología, Software, Validación, Visualización, Escritura–borrador original, Escritura–revisión y edición. **A.A.D.:** Conceptualización, Aná-

lisis formal, Curación de datos, Administración del proyecto, Investigación, Metodología, Software, Validación, Visualización, Escritura–borrador original, Escritura–revisión y edición. **M.S.E.:** Conceptualización, Análisis formal, Curación de datos, Administración del proyecto, Investigación, Metodología, Validación, Visualización, Escritura–borrador original, Escritura–revisión y edición. **I.Y.V.:** Conceptualización, Análisis formal, Curación de datos, Administración del proyecto, Investigación, Metodología, Validación, Visualización, Escritura–borrador original, Escritura–revisión y edición. **R.A.B.:** Conceptualización, Análisis formal, Curación de datos, Administración del proyecto, Investigación, Metodología, Validación, Visualización, Escritura–borrador original, Escritura–revisión y edición.

Referencias

- AlHaddid, O., Ahmad, A., y AbedRabbo, M. (2024). Unlocking water sustainability: The role of knowledge, attitudes, and practices among women. *Journal of Cleaner Production*, 476(June), 143697. Online: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143697>
- Almulhim, A. I., y Abubakar, I. R. (2024). Understanding household attitudes to water conservation in Saudi Arabia: towards sustainable communities. *International Journal of Water Resources Development*, 40(2), 174–193. Online: <https://doi.org/10.1080/07900627.2023.2236245>
- Balbin-Romero, G., Carrera-Mija, E., Serrato-Cherres, A., Cordova-Buiza, F., Carbó-Valverde, S., Cuadros-Solas, P. J., ... Aladwani, J. (2024). Shifting landscape of customer preferences: analyzing internet Islamic banking satisfaction during COVID-19. *Banks and Bank Systems*, 11(3), 8–20. Online: <https://doi.org/10.1057/s41599-024-04069-z>
- Beal, C. D., Stewart, R. A., y Fielding, K. (2013). A novel mixed method smart metering approach to reconciling differences between perceived and actual residential end use water consumption. *Journal of Cleaner Production*, 60, 116–128. Online: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.09.007>
- Cary, J. W. (2008). Influencing attitudes and changing consumers' household water consumption behaviour. *Water Supply*, 8(3), 325–330. Online: <https://doi.org/10.2166/ws.2008.078>
- Chen, M. F. (2020). The impacts of perceived moral obligation and sustainability self-identity on sustainability development: A theory of planned behavior purchase intention model of sustainability-labeled coffee and the moderating effect of climate change skepticism. *Business Strategy and the Environment*, 29(6), 2404–2417. Online: <https://doi.org/10.1002/bse.2510>
- Chenoweth, J., López-Avilés, A., Morse, S., y Druckman, A. (2016). Water consumption and subjective wellbeing: An analysis of British households. *Ecological Economics*, 130, 186–194. Online: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2016.07.006>
- Coparmex. (2024). *México en crisis por falta de agua*. Online: <https://h7.cl/1oP3G>
- de Koning, J. I. J. C., Ta, T. H., Crul, M. R. M., WEVER, R., y Brezet, J. C. (2016). GetGreen Vietnam: towards more sustainable behaviour among the urban middle class. *Journal of Cleaner Production*, 134, 178–190. Online: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.01.063>
- Djayasinga, M. (2021). Ability and willingness to pay for waste water management services: A case study in Lampung Province, Indonesia. *Journal of Asian Finance*, 8(8), 29–0036. Online: <https://doi.org/10.13106/jafeb.2021.vol8.no8.0029>
- Fatoki, O. (2022). Determinants of employee electricity saving behavior in small firms: The role of benefits and leadership. *Energies*, 15(9). Online: <https://doi.org/10.3390/en15093168>
- Fielding, K. S., Spinks, A., Russell, S., McCrea, R., Stewart, R., y Gardner, J. (2013). An experimental test of voluntary strategies to promote urban water demand management. *Journal of Environmental Management*, 114, 343–351. Online: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.10.027>
- Gaspar-Santos, M. E., Suárez-Véliz, M. F., y Merino-Velásquez, J. (2024). Desarrollo sostenible y el derecho al agua: Una perspectiva global. *Iustitia Socialis. Revista Arbitrada de Ciencias Jurídicas y Criminológicas*, 9(17), 35–49.









- Guo, S., Wu, Z., y Wen, L. (2022). Urban residents' acceptance intention to use recycled stormwater—an examination of values, altruism, social and cultural norms, and perceived health risks. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(5). Online: <https://doi.org/10.3390/ijerph19052825>
- Hair Jr., J. F., M. Hult, G. T., M. Ringle, C., Sarstedt, M., Castillo Apraiz, J., Cepeda Carrión, G. A., y Roldán, J. L. (2019). *Manual de Partial Least Squares Structural Equation Modeling (PLS-SEM) (segunda edición)*. OmniaScience. Online: <https://doi.org/10.3926/oss.37>
- Henseler, J., Ringle, C. M., y Sarstedt, M. (2015). A new criterion for assessing discriminant validity in variance-based structural equation modeling. *Journal of the Academy of Marketing Science*, 43(1), 115–135. Online: <https://doi.org/10.1007/s11747-014-0403-8>
- Imani, B., Allahyari, M. S., Bondori, A., Surujlal, J., y Sawicka, B. (2021). Determinants of organic food purchases intention: The application of an extended theory of planned behaviour. *Future of Food: Journal on Food, Agriculture and Society*, 9(1), 1–12. Online: <https://doi.org/10.17170/kobra-202011192216>
- Jabeen, R., Khan, K. U., Zain, F., y Atlas, F. (2023). Buy green only: Interplay between green marketing, corporate social responsibility and green purchase intention; the mediating role of green brand image. *Business Strategy and Development*, 6(3), 503–518. Online: <https://doi.org/10.1002/bsd2.258>
- Keles, H., Yayla, O., Tarinc, A., y Keles, A. (2023). The effect of environmental management practices and knowledge in strengthening responsible behavior: The moderator role of environmental commitment. *Sustainability*, 15(2). Online: <https://doi.org/10.3390/su15021398>
- Kock, N. (2015). Common method bias in PLS-SEM. *International Journal of E-Collaboration*, 11(4), 1–10. Online: <https://doi.org/10.4018/ijec.2015100101>
- Lowe, B., Lynch, D., y Lowe, J. (2015). Reducing household water consumption: a social marketing approach. *Journal of Marketing Management*, 31(3–4), 378–408. Online: <https://doi.org/10.1080/0267257X.2014.971044>
- Menatizadeh, M., Ataei, P., Karimi, H., y Khoshnodi, Z. (2024). The role of water ethics in the development of water conservation behaviors. *Water Conservation Science and Engineering*, 9(2), 88. Online: <https://doi.org/10.1007/s41101-024-00318-z>
- Milenio. (2024). *Puebla ocupa el segundo lugar a nivel nacional en municipios con mayor sequía*. Online: <https://h7.cl/1oP3P> (18 de julio de 2024)
- Mitev, K., Rennison, F., Hagggar, P., Hafner, R., Lowe, A., y Whitmarsh, L. (2024). Encouraging water-saving behavior during a “moment of change”: the efficacy of implementation intentions on water conservation during the transition to university. *Frontiers in Psychology*, 15. Online: <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2024.1465696>
- Molina, E., Quesada, F., Calle, A., Ortiz, J., y Orellana, D. (2018). Consumo sustentable de agua en viviendas de la ciudad de Cuenca. *Ingenius. Revista de Ciencia y Tecnología*(20), 28–37. Online: <https://doi.org/10.17163/ings.n20.2018.03>
- Muenrath, P., y Nguyen, T. P. L. (2023). Determinants of water use saving behaviour toward sustainable groundwater management. *Groundwater for Sustainable Development*, 20, 1–14. Online: <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2022.100898>
- Müller-Pérez, J., Acevedo-Duque, J., Llanos-Herrera, G. R., García-Salirrosas, E. E., Ovalles-Toledo, L. V., Sandoval Barraza, L. A., y Álvarez Becerra, R. (2022). The Mexican ecological conscience: A predictive model. *Sustainability*, 14(12), 7050. Online: <https://doi.org/10.3390/su14127050>
- Nasiri, A. R., Kerachian, R., Mashhadi, M., Shahangian, S. A., y Zobeidi, T. (2024). Extending the theory of planned behavior to predict the behavior of farmers in choosing low-water-intensive medicinal plants. *Journal of Environmental Management*, 369, 122333. Online: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122333>
- Organización de las Naciones Unidas. (2020). *Objetivo 6: Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos*. Online: <https://h7.cl/1oP3S>
- Otaki, Y., Onuki, Y., y Hosokawa, Y. (2024). Influence of financial incentive and nudge, alone

- and combined, on water-saving behaviors. *Sustainable Futures*, 7(April), 100224. Online: <https://doi.org/10.1016/j.sftr.2024.100224>
- Pelayo, C. A. D., y Arroyo, J. C. (2015). *Investigación de mercados para pequeñas y medianas empresas*. Editorial Universitaria | Libros UDG.
- Pino, G., Toma, P., Rizzo, C., Miglietta, P. P., Peluso, A. M., y Guido, G. (2017). Determinants of farmers' intention to adopt water saving measures: Evidence from Italy. *Sustainability*, 9(1). Online: <https://doi.org/10.3390/su9010077>
- Reynoso Castro, R., y Díaz Barrientos, D. F. (2024). *Diseño de sistema integral de recolección, filtrado y almacenamiento de aguas grises provenientes de la ducha y el lavamanos de una casa habitación*. Online: <https://h7.cl/1oP40>
- Rivera-Pérez, Z. E., Cárdenas-González, M. J., y Rey-Romero, D. C. (2020). Estimación y hábitos del consumo de agua para fines domésticos en una zona residencial de San Cristóbal, Venezuela. *Luna Azul*, 51, 95–120. Online: <https://doi.org/10.17151/luaz.2020.51.6>
- Rodriguez Garcia, T. R. (2024). Agua, justicia y migración en México: una reflexión desde el derecho humano al agua. *Universita Ciencia*, 12(35), 166–181. Online: <https://doi.org/10.5281/zenodo.14420649>
- Rusyani, E., Lavuri, R., y Gunardi, A. (2021). Purchasing eco-sustainable products: Interrelationship between environmental knowledge, environmental concern, green attitude, and perceived behavior. *Sustainability*, 13(9). Online: <https://doi.org/10.3390/su13094601>
- Salem, M. Z., y Ertz, M. (2023). Water consumption rationalization using demarketing strategies in the Gaza Strip, Palestine. *Water Resources and Economics*, 43, 100227. Online: <https://doi.org/10.1016/j.wre.2023.100227>
- Thanki, H., Shah, S., Oza, A., Vizureanu, P., y Burduhos-Nergis, D. D. (2022). Sustainable consumption: Will they buy it again? factors influencing the intention to repurchase organic food grain. *Foods*, 11(19), 3046. Online: <https://doi.org/10.3390/foods11193046>
- Tian, K., y Chen, Z. (2022). What roles do smart sensors play in citizens' water use? from the perspective of household water-saving. *Water Supply*, 22(3), 3519–3525. Online: <https://doi.org/10.2166/WS.2021.385>
- Tijs, M. S., Karremans, J. C., Veling, H., de Lange, M. A., van Meegeren, P., y Lion, R. (2017). Saving water to save the environment: contrasting the effectiveness of environmental and monetary appeals in a residential water saving intervention. *Social Influence*, 12(2–3), 69–79. Online: <https://doi.org/10.1080/15534510.2017.1333967>
- Truong, D. D. (2024). Predictors of solar water heater purchasing intention: an empirical analysis of residential behaviors in Hanoi city, Vietnam. *Environmental Research Communications*, 6(5). Online: <https://doi.org/10.1088/2515-7620/ad4983>
- Yayla, O., Kendir, H., y Arslan, E. (2020). Moderator role of gender in the effect of environmental commitment on environmental responsibility behaviour in hotel employees. *Business & Management Studies: An International Journal*, 8(5), 3971–3990. Online: <https://doi.org/10.15295/bmij.v8i5.1626>
- Zhang, Y., Wang, M., Wang, C., y Ji, L. (2025). The impact mechanism of corporate water-saving behaviors on consumer response: A case study on high water-consuming corporations. *Water*, 17(1). Online: <https://doi.org/10.3390/w17010123>
- Zulqarnain, A., y Khan, M. A. (2024, July). Thirsty nation: An investigation into water scarcity and public conservation behaviour in Pakistan. *Water and Environment Journal*. Online: <https://doi.org/10.1111/wej.12930>



PUNTOS CRÍTICOS Y DINÁMICAS SOCIOECOLÓGICAS DEL TOMATE
(*SOLANUM LYCOPERSICUM* L.) BAJO CUBIERTA EN NÚCLEOS
PRODUCTIVOS COLOMBIANOS

CRITICAL POINTS AND SOCIO-ECOLOGICAL DYNAMICS OF TOMATO
(*SOLANUM LYCOPERSICUM* L.) CULTIVATION IN LOW-TECH GREENHOUSE
SYSTEMS IN COLOMBIA

Karla Juliana Rodríguez-Robayo¹, Víctor Camilo Pulido-Blanco², Carlos
Andrés Moreno-Velandia¹, Diego Alejandro Rojas-Ramírez¹, Eduardo
María Espitia-Malagón¹, Mauricio Camelo-Rusínque¹, Andrea del Pilar
Villarreal-Navarrete¹ y Yajaira Romero-Barrera¹

¹Agrosavia. C.I. Tibaitatá, Km 14 vía Mosquera - Bogotá, Cundinamarca, Colombia, C.P. 250047

²Agrosavia. C.I. Tibaitatá, sede Tunja, calle 19 N° 9-35, oficina 902, Tunja, Colombia, C.P. 150001.

*Autor para correspondencia: kjrodriguez@agrosavia.co

Manuscrito recibido el 03 de octubre de 2024. Aceptado, tras revisión el 22 de octubre de 2025. Publicado el 1 de marzo de 2026.

Resumen

La producción de tomate en Colombia enfrenta el reto de equilibrar las demandas de mercado y disminuir el impacto sobre los ecosistemas. Aunque la productividad del cultivo ha aumentado, la dependencia de insumos externos como productos fitosanitarios, fertilizantes e infraestructura que generan residuos sigue siendo alta, por lo que transitar hacia un sistema productivo sostenible requiere el reconocimiento de los aspectos positivos y de mejora. Por lo anterior, el objetivo de este estudio es identificar puntos críticos del cultivo de tomate bajo cubierta en dos regiones geográficas diferentes de Colombia. Para esto, se usó el enfoque del marco de sistemas socioecológicos para facilitar la transición hacia sistemas productivos sostenibles. La metodología contempló la selección de 13 variables y 33 tópicos de análisis que fueron recogidos a través de la aplicación de entrevistas semiestructuradas a actores clave (32) y estructuradas a productores (124), identificándose 14 puntos críticos de los componentes sociales, ambientales y productivos, categorizados en: sistema de unidades y recursos, gobernanza, actores y sistemas productivos, e interacciones. Se destacaron los servicios ecosistémicos de provisión de agua y suelo, la tenencia de la tierra, la adopción de tecnologías y las prácticas de reducción de contaminantes. Estos puntos son clave para impulsar un cambio hacia una producción sostenible en las regiones estudiadas.

Palabras clave: Sostenibilidad, invernaderos, plaguicidas, residuos, inocuidad, prácticas sustentables.

Abstract

Tomato cultivation in Colombia must balance market demands while minimizing environmental impact. Despite productivity improvements, it still depends on external inputs such as phytosanitary products, fertilizers, and infrastructure that produce waste. Hence, the transition to sustainable cropping requires recognition of positive aspects and areas for improvement. This study aims to identify critical points in tomato cultivation under low-tech greenhouses in two different geographic regions in Colombia. The socio-ecological systems framework was adopted to promote a transition to sustainable production. The methodology considered the selection of 13 variables and 33 topics of analysis collected through the application of semi-structured interviews with key actors (32) and structured interviews with tomato producers (124). Fourteen critical points were identified across social, environmental, and productive components, categorized into: system of units and resources, governance, actors and production systems, and interactions. Notable points include ecosystem services related to water and soil provision, land tenure, technology adoption, and pollutant reduction practices. These points are crucial for driving a shift towards sustainable production in the regions studied.

Keywords: Sustainability, greenhouses, pesticides, residues, food safety, sustainable practices.

Forma sugerida de citar: Rodríguez-Robayo, et al. (2026). Puntos críticos y dinámicas socioecológicas del tomate (*Solanum lycopersicum* L.) bajo cubierta en núcleos productivos colombiano. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*. Vol. 43(1):79-99. <https://doi.org/10.17163/lgr.n43.2026.04>.

Orcid IDs:

Karla Juliana Rodríguez-Robayo : <https://orcid.org/0000-0003-0947-9372>

Víctor Camilo Pulido-Blanco : <https://orcid.org/0000-0002-1217-6877>

Carlos Andrés Moreno-Velandia : <https://orcid.org/0000-0001-8692-7613>

Diego Alejandro Rojas-Ramírez : <https://orcid.org/0000-0002-6092-7428>

Eduardo María Espitia-Malagón : <https://orcid.org/0000-0002-4690-393X>

Mauricio Camelo-Rusique : <https://orcid.org/0000-0001-8733-6655>

Andrea del Pilar Villarreal-Navarrete : <https://orcid.org/0000-0001-9580-6936>

Yajaira Romero-Barrera : <https://orcid.org/0000-0002-6512-7307>

1 Introducción

La producción de alimentos es un reto constante en todo el mundo (Pérez-Vázquez y cols., 2018). En América Latina, la producción se debate entre alcanzar los volúmenes y calidad requeridos en el mercado y disminuir el impacto sobre los ecosistemas (Benton y cols., 2021). No obstante, la selección de cultivos está determinada por una lógica minifundista (Berdegué y Escobar, 2004), donde predomina la rentabilidad sobre el impacto ambiental y sobre la salud del productor y del consumidor. Esto crea un mercado que valora más las características organolépticas que la inocuidad del producto.

Un ejemplo de dicha situación es el tomate (*Solanum lycopersicum* L.), que es la hortaliza que ocupa el primer lugar en producción mundial y el segundo lugar en superficie sembrada. China es el principal productor con 67.636.724,8 t en 2021; en América Latina y el Caribe, Colombia ocupa el quinto lugar con 875.436,86 t, después de México, Brasil, Argentina y Chile (FAOSTAT, 2023).

En Colombia, el cultivo de tomate se desarrolla tanto a campo abierto como en condiciones protegidas. Tanto el área como la producción bajo cubierta han mantenido una tendencia creciente en las últimas dos décadas, aumentando del 11% en 2009 al 41,45% en 2019. En 2022, se sembraron 10.079 ha a campo abierto con un rendimiento promedio de 27 t/ha, y 7.616 ha bajo cubierta, con un rendimiento promedio de 83,74 t/ha (Agronet, 2024). La diferencia en el rendimiento entre ambas formas de producción se debe al efecto de las cubiertas, las cuales optimizan el potencial productivo del material vegetal (J. Jaramillo y cols., 2012).

En 2022, Boyacá lideró la producción de tomate bajo cubierta en Colombia con 209.316 t. Aunque sigue entre las tres regiones más productivas, los rendimientos se han estancado en contraste con el crecimiento del área de producción, la cual aumen-

tó 590% en 7 años, alcanzando 2.185 ha (Agronet, 2024). Cundinamarca, en segundo lugar, reportó 869 ha cultivadas en el año 2022. Aunque el área de cultivo sigue aumentando en ambas regiones, el rendimiento ha mantenido una tendencia decreciente (Agronet, 2024).

En la transición hacia sistemas productivos sostenibles, en la que actualmente avanza el mundo (Food and Agricultural Organization, 2021), es fundamental el trabajo coordinado entre productores, técnicos e investigadores de diferentes áreas de conocimiento; de tal forma que, un sistema productivo se aborde como un medio de vida inmerso en dinámicas ambientales, socioeconómicas y culturales de un territorio. En este contexto, el objetivo del estudio es analizar el cultivo de tomate bajo cubierta, identificando los puntos críticos que pueden afectar el proceso de la producción sostenible en dos de las principales regiones productoras de Colombia, utilizando el marco de sistemas socioecológicos, un marco de análisis integral que permite proporcionar recomendaciones multidimensionales.

2 Materiales y métodos

2.1 Descripción de la zona de estudio

El trabajo considera dos regiones o núcleos dinámicos de la creciente producción de tomate bajo invernadero: La provincia de Oriente en Cundinamarca, municipios de Cáqueza, Choachí y Fómeque; y la provincia de Alto Ricaurte en Boyacá, municipios de Sutamarchán, Santa Sofía, Sáchica, Tinjacá y Villa de Leyva (Figura 1).

En la actualidad, los municipios estudiados producen aproximadamente el 27% del tomate cosechado bajo condiciones protegidas en Colombia, 150.669 t producidas en los municipios de Boyacá y 12.207 t producidas en los municipios de Cundinamarca (Agronet, 2023).

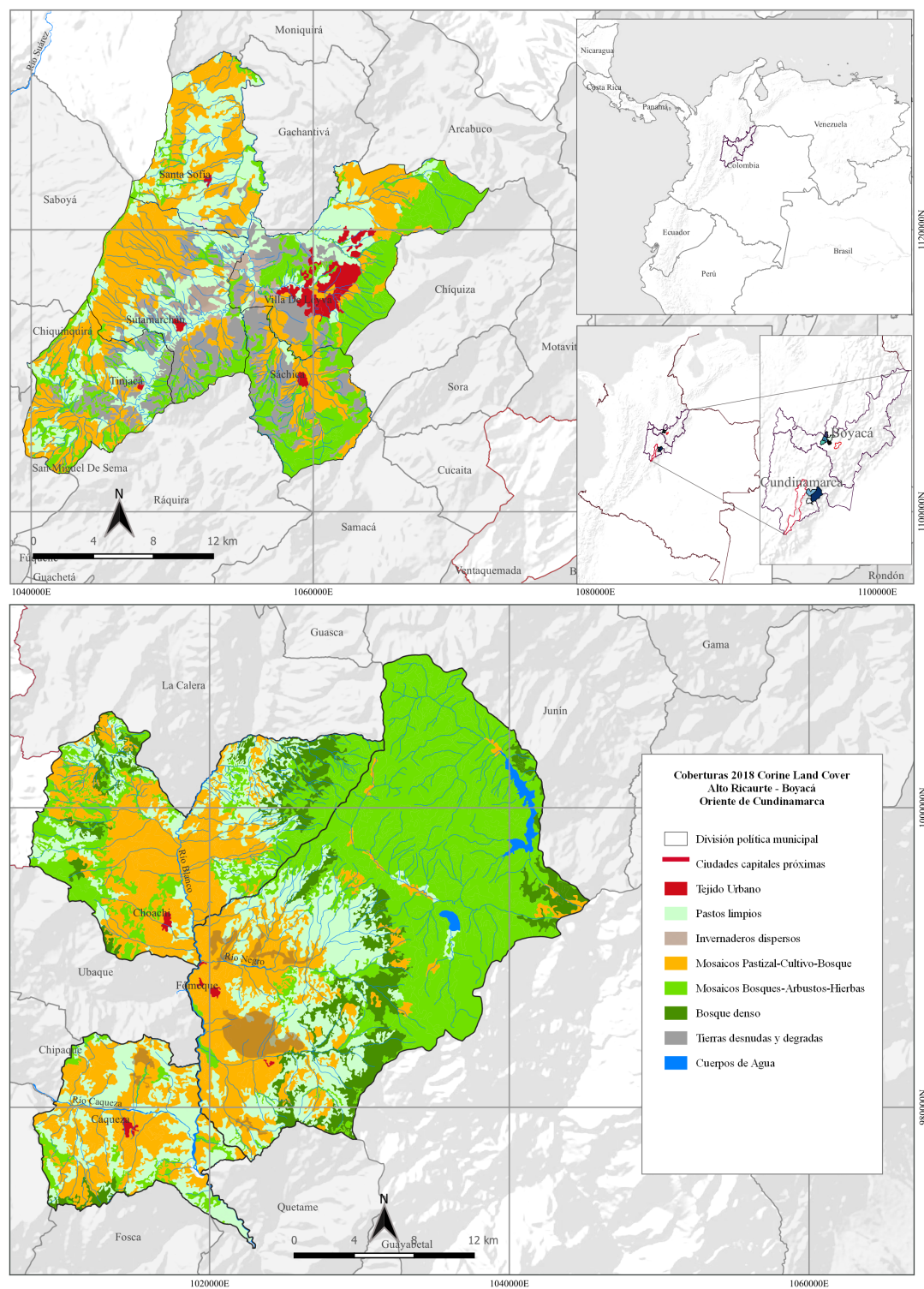


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio. Fuente: Los autores a partir de Corine Land Cover.

2.2 Componentes y variables para abordar el análisis de Sistemas Socioecológicos

El análisis de sistemas socioecológicos (SSE) integra las dimensiones ambiental y socioeconómica, lo que permite contar con una comprensión del territorio en la que se reconoce que agentes sociales y biofísicos interactúan y se retroalimentan en escalas múltiples, temporales y espaciales (Ostrom, 2009).

Existen diferentes propuestas teóricas para acercarse al análisis socioecológico; sin embargo, la propuesta de McGinnis y Ostrom (2014) se destaca por contar con una estructura organizativa clara, coherente, flexible y adaptable a diversos contextos (Nagel y Partelow, 2022), que son bondades que superan limitaciones tales como la complejidad en la interpretación de los resultados y la dificultad por integrar un enfoque dinámico en las variables (Hinkel y cols., 2015).

En Colombia, el marco se ha utilizado de manera exclusiva para abordar el manejo de recursos hídricos (Díaz-Pinzón y cols., 2024; Gomez-Jaramillo y cols., 2024), y más limitadamente para abordar sistemas alimentarios agroforestales (Rodríguez y cols., 2023) y cacaoteros (Quiroga y cols., 2024); de tal forma que este estudio representa un esfuerzo por avanzar en integrar la producción sostenible y el análisis de sistemas socioecológicos.

El marco desglosa los sistemas socioecológicos en cinco componentes:

- **Sistema y unidades de recurso:** describe los

recursos naturales disponibles en el territorio.

- **Gobernanza:** profundiza en los procesos de toma de decisiones como reglas, normas y tenencia de la tierra.
- **Actores y sistema productivo:** describe las características de la población de la región.
- **Interacciones:** describe las relaciones entre los componentes, como los problemas y conflictos presentes en el territorio.
- **Condiciones exógenas:** desarrolla las características sociales, económicas, políticas y ecosistémicas dadas. Este componente se abordó de manera complementaria a través de revisión de información secundaria.

Utilizando el método de consulta de expertos (Herrera-Masó y cols., 2022), que se asemeja al método Delphi (López-Gómez, 2018) en la conformación del panel de expertos, con la participación de investigadores con experiencia en tópicos ambientales, sociales, económicos y productivos con énfasis en suelos, plagas, enfermedades y poscosecha, se hicieron talleres y reuniones en modalidad híbrida (virtual y presencial) donde en las rondas de concertación se definieron un conjunto de variables a analizar en cada componente. Así, se consolidó una matriz con 13 variables y 33 tópicos (Tabla 1).

A partir de la información secundaria, se abordaron las condiciones exógenas, considerando las tendencias demográficas, los índices de marginación y pobreza, y las políticas de producción sostenible con incidencia en los territorios.

Tabla 1. Síntesis de variables de la matriz socioecológica

Componente	Variable	Tópico
Sistema y unidades de los recursos hídricos	Servicios ecosistémicos	SUR1. Actores clave que al ser consultados por los servicios ecosistémicos hacen mayor énfasis en las actividades productivas. SUR2. Servicios ecosistémicos más destacados por los actores clave. SUR3. Servicios ecosistémicos más reconocidos por los productores.
	Recursos hídricos	SUR4. Actores clave que perciben que el recurso hídrico es escaso y que la calidad del recurso hídrico es regular.

Continúa en la siguiente página...

Tabla 1 – continuación de la página anterior

Componente	Variable	Tópico
	Zonas de conservación	SUR5. Productores que perciben que en verano el agua es suficiente para las familias y los cultivos.
		SUR6. Actores clave que identifican zonas de conservación local, regional y nacional.
		SUR7. Productores que consideran que la protección de los recursos naturales es tan importante como la producción agropecuaria. SUR8. Productores que manifiestan contar con zonas de conservación en sus predios.
Gobernanza	Tamaño de la tierra	G1. Percepción de actores clave sobre el tamaño de la tierra (unidad productiva) por familia. G2. Superficie promedio trabajada por las familias de los productores.
	Tenencia de la tierra	G3. Percepción de los actores clave sobre el tipo de tenencia de la tierra. G4. Porcentaje de productores que se reconoce como propietario de la tierra.
	Organización local	G5. Actores clave que identifican organizaciones locales. G6. Productores vinculados a una organización local.
Actores y sistema productivo	Principales actividades económicas	A1. Principales actividades económicas identificadas por los actores clave. A2. Actores clave que perciben la importancia del cultivo de tomate en la región.
	Características de los productores de tomate	A3. Superficie promedio trabajada por las familias. A4. Edad promedio de los productores. A5. Escolaridad de los productores. A6. Tamaño de los hogares de los productores.
	Características relevantes del cultivo de tomate	A7. Productores por tipo y procedencia del material vegetal. A8. Productores por tipo de prácticas asociadas a la salud del suelo (desinfección y fertilización). A9. Productores afectados por los principales problemas fitosanitarios. A10. Productores por tipo de riego y fuente de agua. A11. Nivel de producción y porcentaje de productores por tipo de comercialización y certificación.
	Principales problemáticas productivas	A12. Principales problemáticas productivas percibidas por actores clave.
Interacciones	Problemáticas ambientales	I1. Principales problemas ambientales descritos por actores clave. I2. Productores que perciben que el cultivo de tomate impacta negativamente al ambiente. I3. Principales impactos negativos ambientales reconocidos por los productores.
	Problemáticas sociales	I4. Principales problemas sociales descritos por actores clave.
	Prácticas orientadas a la sostenibilidad	I5. Productores que implementan por lo menos una práctica orientada a la sostenibilidad. I6. Principales prácticas orientadas a la sostenibilidad utilizadas por los productores.

2.3 Recolección y análisis de información

Se incluyó el diseño y aplicación de entrevistas semiestructuradas a actores clave (Conagua, 2013) y entrevistas estructuradas a productores de tomate. Estas herramientas se aplicaron entre diciembre de 2022 y febrero de 2023.

La selección de los actores clave se realizó a partir de la revisión de información secundaria y a través de las secretarías locales, reconociendo la experiencia en producción sostenible; así, se consideraron actores vinculados a procesos ambientales, sociales y productivos en la región. En el caso de los productores seleccionados, se trabajó en las veredas históricamente reconocidas por la producción de tomate, identificando los agricultores a entrevistar con líderes de cada región.

Los instrumentos diseñados se revisaron por los profesionales que ofrecen asistencia técnica en el cultivo de tomate en las dos regiones de estudio; y a la vez, el formato de entrevista estructurada se validó con cuatro productores, dos en cada región. Finalmente, las entrevistas estructuradas y semiestructuradas se aplicaron personalmente por investigadores que participaron en su diseño, quienes conocían el objetivo de los instrumentos y contaban con la capacidad de ampliar y explicar las preguntas cuando fuese necesario, lo que garantizó mejores tasas de respuesta e información acertada para las preguntas abiertas y cerradas que se diseñaron.

El formato de entrevista semiestructurada incluyó 16 preguntas y se realizaron 32 entrevistas a actores clave (16 por región): gobierno regional (1), local (18), técnicos independientes (3), viverista (1), líder técnico de proyecto (1), productores con experiencia en uso de prácticas sostenibles (7) y productor de bioinsumos (1). Las entrevistas fueron grabadas, transcritas y consolidadas para su posterior análisis.

El formato de entrevista estructurada incluyó 39 preguntas en cinco secciones. Se realizaron 124 entrevistas (62 por región) con un muestreo no probabilístico por conveniencia. La información fue colectada en físico, sistematizada y analizada con estadística descriptiva en Excel y análisis de correspondencia múltiple (Johnson y Wichern, 2002).

3 Resultados y discusión

A nivel local, la mayoría de los municipios en la zona de estudio son de sexta categoría. Esta clasificación se debe a su baja densidad poblacional, que no supera los 10,000 habitantes, y a sus ingresos corrientes de libre destinación, que anualmente son inferiores a 15,000 salarios mínimos legales mensuales vigentes (aproximadamente US\$ 5.517.441). Esta situación se traduce en estructuras organizacionales gubernamentales más pequeñas.

A escala regional, la zona de estudio se ubica en los departamentos de Cundinamarca y Boyacá, los cuales están estratégicamente conectados a la capital del país. Según el Índice Departamental de Competitividad de 2023, estos departamentos ocupan las posiciones 9 y 10, respectivamente, de un total de 32 (Consejo Privado de Competitividad y SCORE-Universidad del Rosario, 2023). Ambos se destacan por sus avances en infraestructura, adopción de TICs, educación e innovación. Sin embargo, cada departamento enfrenta desafíos específicos. Boyacá debe mejorar en áreas como el entorno de negocios, el mercado laboral, el tamaño del mercado, y la sofisticación y diversificación de su economía. Por su parte, Cundinamarca tiene retos significativos en la sostenibilidad ambiental, la salud y el sistema financiero.

En materia de política pública, Colombia cuenta con un marco normativo sólido que promueve la agricultura sostenible, incluyendo la Ley General de Desarrollo Agropecuario y Pesquero (Congreso de Colombia, 1993), la Política Nacional de Producción y Consumo Sostenible (MAVDT, 2010), y la Estrategia Nacional de Economía Circular (MADS y MCIT, 2019). Estos instrumentos han guiado la creación de planes de gobierno nacionales y departamentales con el objetivo de fomentar sistemas agrícolas sostenibles. No obstante, Pérez (2020) señala que es crucial mejorar la coordinación entre los sectores ambiental y agropecuario para implementar medidas que logren un equilibrio efectivo entre la conservación y la producción; así como un mayor esfuerzo para sensibilizar a los consumidores sobre la importancia de la calidad, inocuidad y el impacto de los productos alimenticios que consumen.

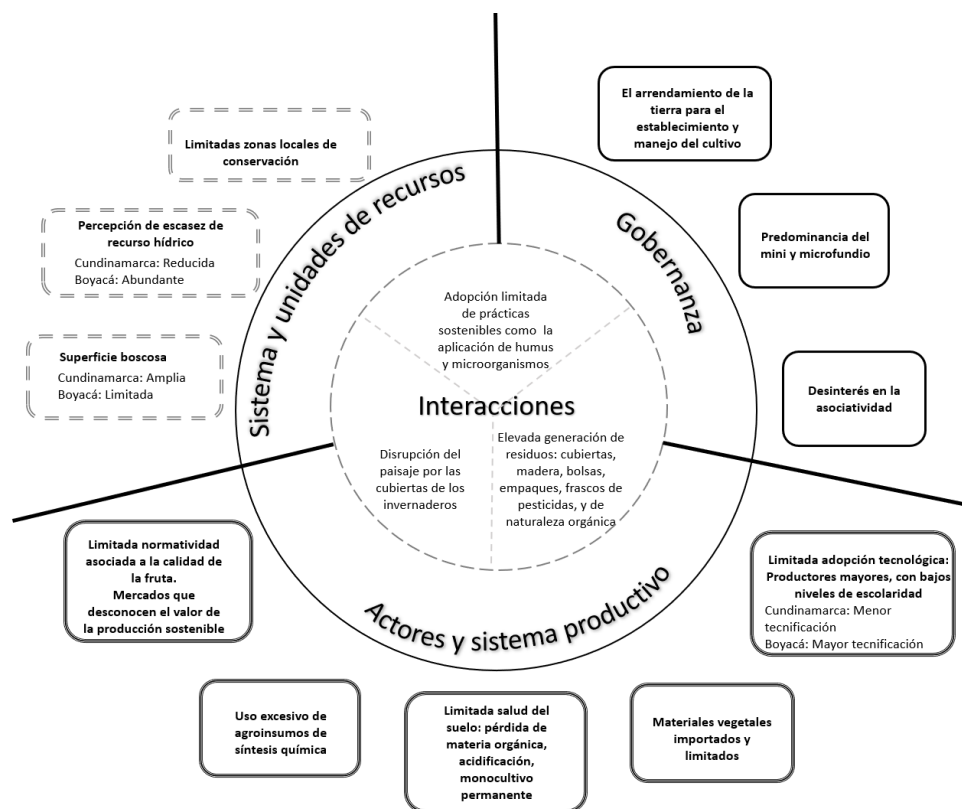


Figura 2. Síntesis de los puntos críticos identificados.

Entrando a analizar los demás componentes, se hallaron 14 puntos críticos organizados en los componentes de sistema y unidades de recurso, gobernanza, actores y sistema productivo e interacciones (Figura 2).

Antes de analizar los puntos críticos identificados, es importante resaltar que algunos de estos puntos se constituyen en bucles de retroalimentación del sistema, que explican la naturaleza compleja y los patrones asociados del comportamiento del sistema socioecológico (Preiser y cols., 2018).

De esta forma, los bucles de retroalimentación contribuyen a la comprensión de círculos viciosos de barreras que perpetúan y obstaculizan un sistema (Hanf y cols., 2025). La definición y comprensión de estos bucles favorece los procesos de toma de de-

cisiones (Rodríguez-Gonzalez y cols., 2020), en este caso orientadas a avanzar hacia una producción sostenible. Los bucles de los sistemas socioecológicos analizados en este estudio se relacionan principalmente con aspectos de los componentes de actores y gobernanza, relacionados con la tenencia de la tierra, la organización local y el rezago tecnológico.

3.1 Análisis de correspondencia múltiple

A partir del análisis de correspondencia múltiple, las dos primeras dimensiones generadas explican el 25,21% de la variabilidad de las observaciones registradas, que es un porcentaje adecuado (Asan y Greenacre, 2008) que permite diferenciar tres grupos de productores (Figura 3).

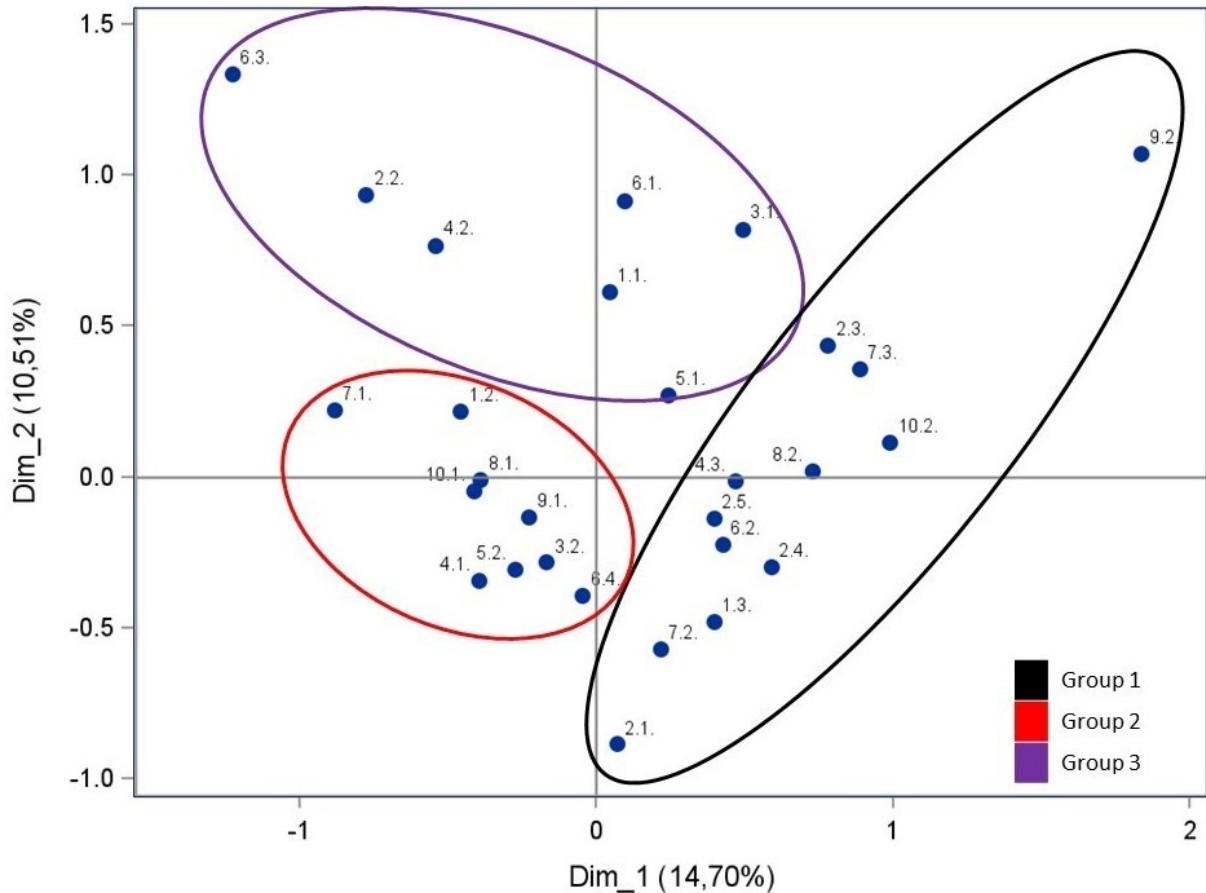


Figura 3. Análisis de correspondencia múltiple.

Componente de Sistema y unidades de recurso: 1. Disponibilidad de agua en verano (categorías: 1.1. A veces, 1.2. Insuficiente, 1.3. Suficiente); 2. Beneficios de la naturaleza (2.1. Agua para uso doméstico y cultivos, 2.2. Agua para uso doméstico y cultivos; alimentos y leña del bosque, 2.3. Agua para uso doméstico y cultivos; aire limpio y otros beneficios, 2.4. Aire limpio, Otros beneficios, 2.5. Otros beneficios); 3. Predios o áreas de conservación (3.1. Sí tienen, 3.2. No tienen). **Gobernanza:** 4. Tenencia (4.1. Arrendatario, 4.2. Otra tenencia, 4.3. Propietario). **Actores y sistema productivo:** 5. Análisis del suelo (5.1. Sí hacen, 5.2. No hacen); 6. Percibe afectación por agroquímicos (6.1. Sí, sobre el ambiente, 6.2. Sí, sobre las personas, 6.3. Sí, sobre las personas y el ambiente, 6.4. No). **Interacciones:** 7. Aplica biofertilizantes (7.1. No, 7.2. Sí, uno, 7.3. Sí, dos o más); 8. Hace prácticas para la protección del suelo (8.1. No, 8.2. Sí, una o dos); 9. Hace prácticas para la protección de la biodiversidad (9.1. No, 9.2. Sí, una o dos); 10. Aplica bioplaguicidas (10.1. No, 10.2. Sí, uno o más).

Grupo 1. Productores con orientación a la sostenibilidad: Propietarios de la tierra que afirman no tener escasez de agua y reconocen los beneficios de la naturaleza como provisión de aire limpio. Son conscientes del impacto negativo de los agroquímicos sobre la salud de las personas, por lo que incorporan prácticas orientadas a la sostenibilidad, como uso de biofertilizantes, bioplaguicidas y prácticas para proteger el suelo.

Grupo 2. Productores con agricultura tradicional: Arriendan la tierra, por ende, no poseen pre-

dios o áreas en conservación; perciben escasez del agua en verano y manifiestan no realizar análisis de suelo para la toma de decisiones en el manejo del cultivo. Estos productores dicen desconocer los efectos negativos del uso de agroquímicos y manifiestan no utilizar prácticas orientadas a la sostenibilidad en sus cultivos.

Grupo 3. Productores con conciencia ambiental y manejo convencional: Con otras formas de tenencia de la tierra (poseen el predio sin título, o en sociedad con otros productores), manifiestan con-

tar con predios o áreas en conservación y perciben que el agua algunas veces es suficiente en época de verano. Reconocen como servicios ecosistémicos la provisión de agua y la provisión de alimento y leña. Reconocen que el uso de agroquímicos afecta al ambiente y a las personas. Si bien estos productores manifiestan no realizar prácticas orientadas a la sostenibilidad, declaran hacer análisis del suelo en sus cultivos para la fertilización.

3.2 Sistema y unidades de recurso

Tres puntos críticos: superficie boscosa, percepción de escasez de recurso hídrico y zonas de conservación locales y regionales.

La percepción en torno a la disponibilidad de recurso hídrico fue contrastante entre las dos regiones, al igual que el reconocimiento de las zonas de conservación nacional. En Boyacá se percibe mayor

escasez de agua y se reconocen limitadamente las zonas de conservación, en comparación con Cundinamarca (Tabla 2).

En Boyacá se observó una baja área de bosque estable y de conservación, afectando los ecosistemas estratégicos. Ramos y cols. (2022) reportaron que los remanentes están desapareciendo debido a la expansión agropecuaria. En los municipios estudiados, el área de bosque estable no supera las 150 ha (Departamento Nacional de Planeación, 2023), es decir menos del 2% del área total.

La escasez hídrica ha impactado las actividades económicas, subrayando la necesidad de equilibrar acciones de conservación y producción. Es esencial identificar áreas de conservación y desarrollar estrategias de restauración y reconversión para recuperar la cobertura forestal.

Tabla 2. Resultados variables del sistema y unidades de recurso

Variable	Tópico	Boyacá	Cundinamarca
Servicios ecosistémicos	SUR1	56,2%	12,5%
	SUR2	Disponibilidad de recurso hídrico Suelos aptos para la agricultura	Disponibilidad de recurso hídrico
	SUR3	Agua para uso doméstico (87%) Alimento-leña (65%) Aire limpio (50%)	Agua para uso doméstico (71%)
Recurso hídrico	SUR4	93,8%	25%
	SUR5	26%	61%
Zonas de conservación	SUR6	Locales o regionales (37,5%) Nacionales (6,2%)	Locales o regionales (56,2%) Nacionales (37,5%)
	SUR7	98%	97%
	SUR8	35%	48%

En contraste, en Cundinamarca, los municipios cuentan con 3.000 y 6.000 ha de bosque estable (Departamento Nacional de Planeación, 2023), lo que representa cerca del 13% de su área total, garantizando buen acceso al recurso hídrico y una percepción de abundancia de agua. No obstante, el paisaje se ha transformado en un mosaico de fragmentos de bosque, pasturas, zonas de páramo y cultivos, con una tendencia a la disminución de áreas de

conservación y una mayor vulnerabilidad de las comunidades (Buitrago, 2022).

El análisis de correspondencia múltiple reveló que el grupo que implementa prácticas sostenibles percibe menos escasez del recurso hídrico y reconoce servicios ecosistémicos adicionales, como el aire limpio.

El análisis del componente de sistema y unidades de recursos permitió conocer tanto el estado de los recursos naturales esenciales para el desarrollo del cultivo, como el relacionamiento de los productores con la naturaleza; así se tiene que en Boyacá se percibe un mayor impacto de la actividad agropecuaria y unos recursos naturales cada vez más escasos, lo cual se relaciona con la ubicación geográfica e historia productiva de cada región. Al respecto, las formas de relación y aprovechamiento de los recursos naturales en cada región ocasionaron disrupciones distintas de la matriz paisajística. Esto es especialmente visible en Boyacá, donde el paisaje rural ha sido modificado por las cubiertas de los invernaderos, causando menor atractivo y afectando el turismo en zonas mundialmente reconocidas como el Valle de Villa de Leyva, sumándose a la percepción de escasez de agua, y subrayando la necesidad de transitar hacia una producción sostenible. Cundinamarca, debido al mayor recurso hídrico y la subsecuente mayor cobertura boscosa, no muestra una afectación tan acusada sobre el paisaje.

3.3 Gobernanza

Tres puntos críticos: predominancia de la propiedad privada y del minifundio en las dos regiones, así como la limitada participación en organizaciones locales (Tabla 3).

Un aspecto que vulnera a las comunidades tomateras y amenaza la estabilidad del sistema es la baja capacidad organizativa de los productores. El interés particular dificulta la articulación, lo que, según Escobedo (2018), también afecta a otras cadenas de valor como la del café. Esto resalta la necesidad de cooperación, compromiso y flujo de información con una visión de ganar-ganar; de lo contrario, el sistema fracasa por insuficiencia de conocimientos empíricos y falta de organización (Vargas-Hernández, 2013).

La producción de tomate bajo cubierta es intensiva y de pequeña escala, lo que impacta la sostenibilidad. Gamboa y cols. (2020) señalan una relación inversa entre sostenibilidad y tamaño predial. La pequeña dimensión de los predios limita la conservación de vegetación por priorizar el uso productivo. Además, el análisis de correspondencia múltiple muestra que los propietarios aplican prácticas más sostenibles que los arrendatarios.

Este hallazgo es importante en Colombia, que tiene un coeficiente Gini de 0,897 en propiedad de la tierra (Alzate, 2020), el tercero más alto en Latinoamérica, donde pocos poseen tierras y muchos son arrendatarios. Estos últimos no perciben las consecuencias del uso de la tierra más allá del interés económico, lo que resalta la necesidad de fortalecer su conciencia ambiental.

Tabla 3. Resultados variables de gobernanza

Variable	Tópico	Boyacá	Cundinamarca
Tamaño de la tierra	G1	1–5 ha	
	G2	2,6 ha	1,6 ha
Tenencia de la tierra	G3	Propietarios (con constancia de posesión o con documentos que acreditan la herencia)	
	G4	41%	55%
Organización local	G5	56,2%	68,8%
	G6	11,3%	5%

El análisis del componente de gobernanza permitió identificar las fuertes similitudes en las dos regiones estudiadas en términos del tipo de tenencia de la tierra bajo la figura de propiedad privada, predominancia del minifundio y limitada capa-

cidad organizativa en la región. Estos aspectos deben moldear las propuestas de producción sostenible que se diseñen para la región y que se relacionan con que estas dos regiones concentran el 25% de la población del país.

Tabla 4. Resultados de la variable: Características del cultivo de tomate

Tópico	Subtópico	Boyacá	Cundinamarca
A7	Tipo Chonto ¹	90%	95%
	Tipo Larga vida ²	10%	5%
	Procede de un vivero	92%	88,8%
A8	Fertiliza a partir de un análisis de suelo	56,9%	56,4%
	Desinfecta el suelo con productos químicos	83,9%	67,7%
	Aplica materia orgánica al suelo	16,1%	50%
	Aplica fertilizantes químicos	100%	100%
A9	Problemas sanitarios más reportados		
	Cogollero (<i>Tuta absoluta</i>) (53%)	Fusarium (<i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>lycopersici</i>) (32%)	
	Mosca blanca (<i>Trialeurodes vaporariorum</i>) (52%)	Caracha (<i>Prodiplosis longifila</i>) (23%)	
	Botrytis (<i>Botrytis cinerea</i>) (31%)	Cogollero (<i>Tuta absoluta</i>) (21%)	
A10	Riego por goteo	100%	95,1%
	Principal fuente de agua para riego	Reservorios: 60,8% Nacimiento y quebradas: 39,2%	Reservorios: 35,4% Nacimientos y quebradas: 64,6%
A11	Producción promedio (t/ha/año)	51	32
	Certificación en buenas prácticas agrícolas	1,6%	0%
	Acuerdo de venta con el comprador ³	72,6%	83,7%

¹ Tipo de tomate usado para la preparación de guisos.

² Tipo de tomate usado para la preparación de ensaladas.

³ Convenios formales e informales entre el productor y el intermediario para la venta de la cosecha.

3.4 Actores y sistema productivo

Cinco puntos críticos: reducida adopción de tecnologías, materiales vegetales importados, limitada salud del suelo, uso excesivo de agroinsumos, y rezago normativo y de mercado con énfasis en inocuidad (Tabla 4).

Los entrevistados en Boyacá y Cundinamarca señalaron el cultivo de hortalizas y la ganadería como principales actividades económicas, destacando la relevancia del cultivo de tomate. En Boyacá, los productores tienen en promedio 49 años; el 37,1% de ellos completó los estudios primarios, mientras que el 19,4% no la terminó; y en promedio se dedica 0,89 ha de su unidad productiva al cultivo de tomate. En Cundinamarca, la edad promedio de los productores es de 47 años; el 47,5% de ellos completó la primaria y el 23% no la terminó; y se dedican 1,4 ha al tomate. Los hogares en ambas regiones están compuestos por 3 a 4 personas (Tabla 4).

Entre las principales problemáticas asociadas al cultivo de tomate, en Boyacá, se destacan los altos costos de infraestructura (cubierta y riego) y agroinsumos (56,2%), seguidos por el impacto de plagas y enfermedades (37,5%) y las dificultades en comercialización y acceso a mercados (37,5%). En Cundinamarca, se resalta el impacto de plagas y enfermedades (43,8%) y el inadecuado manejo de suelo y agua (43,8%).

De los cinco puntos críticos, el primero se relaciona con la limitada adopción de tecnología. Los productores enfrentan dificultades para acceder a información confiable y capacitaciones sobre tecnologías en agricultura protegida. Además, el apego a modelos de producción tradicionales genera resistencia al cambio, limitando mejoras y manteniendo la dependencia de tecnología obsoleta.

Cachipuendo y cols. (2025) señalan, en el contexto ecuatoriano, que la baja tecnificación de los

sistemas agrícolas restringe el uso apropiado del agua. Esta limitación se asocia con infraestructura de baja eficiencia, escaso mantenimiento y ausencia de instrumentos de medición que permitan un control racional del recurso hídrico. Los autores destacan que la falta de innovación tecnológica, junto con la gestión comunitaria tradicional del riego, reduce la capacidad para adaptarse a las variaciones climáticas y compromete el mantenimiento de los cultivos a largo plazo.

Las características socioeconómicas como la edad y escolaridad influyen en la productividad de los cultivos. Cano y cols. (2016) indican que una mayor formación se asocia con una mayor productividad, mientras que el aumento de edad tiende a reducirla, posiblemente por la escasa adopción de innovaciones tecnológicas ofrecidas por asociaciones, gremios e instituciones científicas. En Colombia, diversas instituciones brindan conocimiento socialmente relevante, pero a menudo duplican esfuerzos y enfoques, generando visiones divergentes.

En términos de edad, no se observa integración ni relevo generacional. En Colombia, como en otros países latinoamericanos, la agricultura familiar está dominada por mano de obra masculina envejecida (70%). Esto se debe a la migración juvenil hacia las ciudades por falta de oportunidades en las zonas rurales, afectando la economía regional al reducir la mano de obra y disminuir la productividad de cultivos tradicionales (López y cols., 2018), lo que pone en riesgo la sostenibilidad del cultivo dentro de la estructura etaria familiar.

Este rezago también se refleja en los rendimientos de cultivo, en donde la producción promedio es de 51 t/ha año en Boyacá y 32 t/ha año en Cundinamarca. Con un rendimiento promedio de 46,6 t/ha año, Colombia ocupa el puesto 59 a nivel mundial, frente a rendimientos superiores a 300 t/ha año en Países Bajos, Bélgica, Suecia, Finlandia, Dinamarca, Irlanda y Reino Unido (FAOSTAT, 2023). Esto sugiere que existe una brecha tecnológica en Colombia, pero también representa una oportunidad para desarrollar o adaptar tecnologías que mejoren la producción en el país.

El segundo punto crítico de este componente se relaciona con que si bien Colombia es el centro de

origen del tomate (Délices y cols., 2019), los cultivos sembrados se han mejorado en Estados Unidos y Europa, cuyas casas son los proveedores de las semillas que se usan en el país. Sin embargo, la demanda de materiales más resistentes a problemas fitosanitarios como *Fusarium* ha llevado al uso de técnicas como la injertación en las plantuladoras, combinando portainjertos tolerantes e híbridos de alto rendimiento como Libertador y Roble, lo que a su vez ha aumentado el valor de las plántulas para los productores de tomate. La alta demanda de tomate fresco limita el uso de diversidad varietal, restringiendo la estrategia de producción sostenible en mercados locales con usos específicos (Ríos y cols., 2014).

El tercer punto crítico resalta los desafíos asociados a la salud del suelo:

- (i) **Pérdida de materia orgánica:** La falta de prácticas que favorezcan su retención y aumento, como el uso de cultivos de cobertura, limita la mejora del contenido de materia orgánica. Su promoción reduciría el riesgo de erosión y aumentaría la actividad microbiana. Sin embargo, esta práctica no se usa comúnmente, ya que los productores a menudo cambian el sitio de producción cuando la degradación del suelo afecta el rendimiento (Cuellas y cols., 2019).
- (ii) **Acidificación:** Este fenómeno afecta la disponibilidad de nutrientes, impactando la calidad y rendimiento de los cultivos. Las enmiendas calcáreas aplicadas de manera controlada pueden contrarrestar la acidificación y restablecer un pH óptimo (Dikinya y Mufwanzala, 2010).
- (iii) **Falta de rotación de cultivos:** La repetición continua de monocultivos de tomate agota nutrientes específicos, aumentando la vulnerabilidad a fitopatógenos e insectos plaga. Implementar un plan de rotación con especies complementarias puede restaurar la biodiversidad del suelo y reducir la presión sobre ciertos nutrientes (Díaz y cols., 2004).

El cuarto punto crítico es el uso de agroinsumos, el cual representa el 64% de los costos directos del cultivo. La dependencia de productos de síntesis química para el control de plagas y enfermedades refleja una necesidad constante de insumos externos para mantener la sanidad y productividad. El

uso frecuente de plaguicidas genera impactos ambientales y socioeconómicos (Valentín y cols., 2021) y el desbalance ambiental favorece a las plagas que ocupan el espacio de organismos benéficos, obligando a manejos más intensivos que comprometen la inocuidad del fruto (Caro y Cortés, 2020).

Una visión sostenible del cultivo debe adoptar el manejo integrado de plagas y enfermedades con enfoque preventivo, utilizando insumos organominerales, control biológico, trampas y alelopatías para reducir la dependencia de insumos químicos. Los estudios de residuos muestran una alta aplicación de insecticidas, como Clorpirifos, en concentraciones superiores a los LMR establecidos por la Unión Europea ($> 0,1$ ppm) (Guerrero, 2003).

Patiño y cols. (2020) encontraron residuos de plaguicidas como Diflubenzuron y Metamidofos en concentraciones superiores a los LMR. Esto coincide con la percepción de los entrevistados, quienes reportan alta presión de plagas como mosca blanca (*Trialeurodes vaporariorum*) caracha (*Prodidiplosis longifila*) y cogollero (*Tuta absoluta*), cuyo manejo depende principalmente de aplicaciones periódicas de insecticidas químicos.

Estos elementos permiten introducir el quinto punto crítico de este componente, el limitado avance en el desarrollo y puesta en marcha de normas asociadas a la calidad de la fruta. En 2014, se promovió en el país la "Política Nacional Fitosanitaria y de Inocuidad" para implementar un "Plan Nacional de Residuos de Plaguicidas", pero solo en 2022 el ICA inició un monitoreo nacional de residuos, cuyos resultados aún no se han publicado (Instituto Colombiano Agropecuario, 2022).

Avanzar hacia una producción sostenible está ligado a la normatividad, precios y mercados (Codron y cols., 2014; Rodríguez-Robayo y cols., 2022). La normatividad aún está en construcción, y el principal mercado es la Central de Abastos de Bogotá, donde no se requieren certificaciones ni se inspecciona la inocuidad, y el impacto ambiental asociado al proceso productivo no es relevante. Esto explica por qué solo uno de los 124 productores entrevistados tiene certificación en buenas prácticas agrícolas, destacando la necesidad de mercados que valoren la producción sostenible.

El análisis del componente de actores y sistema productivo mostró importantes similitudes entre las dos regiones de estudio. Si bien Boyacá presenta una mayor innovación tecnológica en comparación con Cundinamarca, existe un claro rezago tecnológico en las dos regiones. Los demás tópicos mostraron tanto en Boyacá como en Cundinamarca la urgencia de abordar el cuidado de la salud del suelo, promover el monitoreo del cultivo y otras prácticas para evitar las aplicaciones de agroquímicos por calendario. Así mismo, se evidenció la importancia de reflexionar sobre los problemas de inocuidad del tomate en ambas zonas geográficas, en términos de que exista un incentivo para producir bajo esquemas de producción no convencionales.

3.5 Interacciones

Tres puntos críticos: la infraestructura de los invernaderos y su manejo que generan importantes residuos, e impactan el paisaje, así como los avances en el uso de prácticas orientadas a la sostenibilidad (Tabla 5).

A pesar de las innovaciones en agricultura protegida, la tradición y falta de inversión limitan la adopción de mejoras tecnológicas que aumenten la eficiencia y productividad. Además, el modelo de comercialización del tomate no proporciona el retorno necesario para justificar la inversión tecnológica en el sistema productivo.

Existe una notable disparidad en la tecnificación en los núcleos de Boyacá y Cundinamarca. Los agricultores en Cundinamarca dependen de métodos más tradicionales y menos tecnificados, basados en conocimiento empírico. Esto se debe a la falta de acceso a tecnologías avanzadas y la insuficiente capacitación en prácticas de invernadero. En contraste, Boyacá ha mostrado un mayor nivel de tecnificación, especialmente en sistemas de fertirrigación (Villagran y Bojacá, 2021).

Esto puede deberse a la mejor infraestructura y al fácil acceso a las fincas e invernaderos. Por su parte, en Cundinamarca, el estado de las carreteras dificulta el acceso a los predios, problema que incrementa por la topografía y el clima (Villagran y Bojacá, 2021).

Tabla 5. Resultados variables de interacciones

Variable	Tópico	Boyacá	Cundinamarca
Problemáticas ambientales	I1	<ul style="list-style-type: none"> – Impacto general de las actividades agropecuarias (50%) – Elevado uso de agroquímicos (37,5%) – Contaminación de fuentes hídricas (37,5%) – Aumento de invernaderos y mal manejo de residuos (31,2%) 	<ul style="list-style-type: none"> – Impacto general de las actividades agropecuarias (50%) – Elevado uso de agroquímicos (37,5%)
	I2	71 %	21 %
	I3	<ul style="list-style-type: none"> – Elevado uso de plástico (30,6%) – Deslizamiento y erosión del suelo (21%) – Elevado uso de agroquímicos (19,4%) 	<ul style="list-style-type: none"> – Elevado uso de agroquímicos (14,5%) – Deslizamiento y erosión del suelo (9,7%)
Problemáticas sociales	I4	<ul style="list-style-type: none"> – Migración de jóvenes y falta de mano de obra (56,2%) – Llegada de migrantes extranjeros (31,2%) – Inseguridad, hurto y extorsión (31,2%) 	<ul style="list-style-type: none"> – Migración de jóvenes y falta de mano de obra (37,5%)
	I5	79%	90%
Prácticas orientadas a la sostenibilidad	I6	<ul style="list-style-type: none"> – Incorporación de humus líquido al suelo (32,3%) – Rotación de cultivos (52,2%) – Preparado de ajo-ají como bioplaguicida (31,3%) 	<ul style="list-style-type: none"> – Incorporación de humus líquido al suelo (77,4%) – Microorganismos comerciales (24,2%) – Rotación de cultivos (89,3%) – Preparado de ajo-ají como bioplaguicida (41,4%)

En ambos núcleos se usan cubiertas adaptadas de la producción de flores desde la década de 1970. Aunque estas cubiertas han aumentado la producción de tomate, persisten desafíos para optimizar el desarrollo del cultivo (Villagran y cols., 2021). Uno de los principales retos es la implementación de estructuras adaptadas a las condiciones climáticas locales, con mayor control microclimático y mejor ajuste a las demandas ecofisiológicas del cultivo, lo que mejoraría la eficiencia en el uso de recursos (Rocha y cols., 2021).

Sin embargo, el uso de invernaderos genera residuos al final de la vida útil de los materiales. La principal problemática ambiental del cultivo de tomate bajo invernadero es la generación de residuos sólidos, como cubiertas, madera, bolsas, empaques y frascos de plaguicidas, así como residuos orgánicos.

Las pérdidas de tomate durante la producción, transporte, almacenamiento y consumo generan residuos significativos. Según Martínez y Quintero (2017), el desperdicio de verduras en la poscosecha

en Colombia es del 7%. De las 162.876 t de tomate producidas en 2022 en los municipios de Boyacá y Cundinamarca (Agronet, 2023), se estima que se perdieron 11.401 t.

Por otra parte, el servicio ecosistémico relacionado con la belleza paisajística no fue ampliamente reconocido; el cultivo de tomate bajo cubierta altera el paisaje y genera una disrupción en la matriz ecológica. Esto es notable en Boyacá, especialmente en Villa de Leyva, una zona turística mundialmente reconocida por sus paisajes de desierto, páramo, lagunas y valles (Ramos y cols., 2022). Las cubiertas de los invernaderos han modificado el paisaje, afectando el turismo, que ha señalado la alta visibilidad de los invernaderos y su impacto (Figura 4).

Este impacto se destaca en menor medida en Cundinamarca, posiblemente debido a que es una región menos turística en comparación con Boyacá, la dispersión de los invernaderos y la topografía quebrada de la región.



Figura 4. Cambio en el paisaje por la presencia de invernaderos para la producción de tomate, Sutamarchán, Boyacá. Fotografía: Diego Fernando Sánchez Vivas.

A nivel identitario, el paisaje de ambas zonas se percibe como un factor incidente, unificador y característico que moldea la idiosincrasia de la población, y el paisaje se valora como una ventaja competitiva de los destinos basados en la naturaleza, tal como señalan Clark y cols. (2026), donde el ambiente natural es un factor demandante para las empresas que deben operar dentro de umbrales sostenibles. Al respecto, Olwig (2002) resalta que el paisaje natural emerge a un paisaje cultural, en el que las características geográficas y ecológicas se integran con las modificaciones humanas que incluyen construcciones y usos del suelo (Cosgrove, 2008); sin embargo, en la zona de estudio, se han generado tensiones asociadas a la disrupción de la matriz paisajística, lo que promueve la lucha por la conservación de los símbolos naturales del paisaje y motiva el interés de los productores por transitar hacia la sostenibilidad.

En el cultivo de tomate se identifica la adopción de prácticas agroecológicas (Wezel y cols., 2009)

promovidas bajo modelos de agricultura tropical (C. Jaramillo, 2019). La propuesta regional busca reemplazar insumos químicos por fuentes orgánominerales y biológicas. Sin embargo, los productores de tomate siguen prefiriendo el control químico para el manejo de problemas fitosanitarios, a pesar de las experiencias prometedoras de quienes utilizan biopreparados, los cuales reportan efectos positivos y una reducción en los costos de manejo.

Según Tiftonell (2019), las transiciones agroecológicas son multiescalares y multidimensionales, y en el cultivo de tomate aún son incipientes. Los factores exógenos, como el aumento de precios de agroinsumos químicos postpandemia y la influencia de actores ambientales, han impulsado la conciencia colectiva sobre los riesgos de plaguicidas sintéticos y promovido prácticas agroecológicas (Torres-Carral, 2021).

Finalmente, otro factor dinamizador es el reconocimiento de experiencias positivas en manejo

alternativo. Estudios sobre fuentes de materia orgánica, bioproductos a base de microorganismos y manejo agroecológico del tomate en invernadero muestran resultados alentadores, apoyando la transición hacia modelos de producción sostenible.

El análisis del componente de interacciones evidenció un mayor impacto del cultivo de tomate en Boyacá en comparación con Cundinamarca, atribuible principalmente a la trayectoria productiva de cada región. En Boyacá, el cultivo de tomate cuenta con aproximadamente 25 años de desarrollo, mientras que en Cundinamarca se ha reportado una implementación del sistema desde hace unos 17 años. No obstante, los avances en la adopción de prácticas sostenibles en ambas regiones son limitados y se han enfocado principalmente en el uso de bioproductos o biopreparados, impulsado en gran medida por el incremento en los precios de los agroquímicos.

4 Conclusiones

A partir de las 13 variables y 33 tópicos utilizados en el análisis socioecológico del cultivo de tomate bajo cubierta en los departamentos de Boyacá y Cundinamarca se identificaron 14 puntos críticos que afectan el proceso de producción. De esta forma, se amplía el uso del marco de sistemas socioecológicos a la producción sostenible, trascendiendo su uso en el análisis de las acciones de conservación en el manejo de los recursos naturales.

Las dos regiones productoras de tomate analizadas presentan múltiples similitudes en aspectos sociales y en las prácticas de manejo del cultivo. Sin embargo, las diferencias geográficas e históricas son determinantes en los contrastes observados en cuanto a los componentes del sistema y unidades de recurso y las interacciones. Boyacá, al tratarse de una región con condiciones más secas y con una trayectoria más prolongada en la producción de tomate, ha experimentado una mayor incorporación de innovaciones tecnológicas a lo largo del tiempo. No obstante, esta intensificación ha generado un impacto más evidente sobre el paisaje y los recursos naturales disponibles.

De manera generalizada para las dos regiones estudiadas, el componente de sistema y unidades

de recursos hizo evidente la ausencia o desconocimiento de zonas de conservación local. En el componente de gobernanza predominó la tenencia de la tierra bajo propiedad privada en minifundio, con un amplio desinterés entre los productores por consolidar y participar en organizaciones locales. El componente de actores y sistema productivo reflejó que los cultivos de tomate se desarrollan bajo un uso excesivo de agroinsumos de síntesis química, pérdida de materia orgánica, monocultivos permanentes y acidificación que derivan en una limitada salud del suelo. Por último, el componente de interacciones reflejó una adopción limitada de prácticas sostenibles en el cultivo de tomate, junto con una elevada generación de residuos y un cambio abrupto del paisaje por el aumento de las cubiertas sobre los territorios.

Estos hallazgos sugieren la necesidad de enfocar esfuerzos en: a) fortalecer acciones locales y regionales a favor de la conservación para que en Cundinamarca el recurso hídrico permanezca y en Boyacá no se agote; b) fomentar la conciencia ambiental y el capital social en las familias campesinas productoras de tomate; c) diseñar e implementar tecnologías que promuevan la producción sostenible, protegiendo los recursos esenciales como el suelo y el agua, garantizando un menor impacto sobre el ambiente y una mayor inocuidad en los productos; d) promover el uso de materiales locales en infraestructura, siembra y manejo del cultivo, para reducir la dependencia de insumos externos; e) identificar y desarrollar mercados que valoren la producción sostenible, ya que actualmente no se reconoce plenamente el valor de una producción diferenciada.

Se recomienda que las futuras investigaciones que empleen el marco de sistemas socioecológicos para abordar el análisis de la producción sostenible profundicen bajo un enfoque participativo en la comprensión de los bucles de retroalimentación que permiten determinar las principales barreras para transitar hacia la sostenibilidad, favoreciendo así la definición de estrategias conjuntas entre actores locales, regionales y nacionales que permitan avanzar en la consolidación de territorios sostenibles y resilientes. Así mismo, se recomienda ahondar en los servicios ecosistémicos culturales, en los que además del paisaje se puedan rescatar elementos de sentido de pertenencia, identidad, conexión con la naturaleza, entre otros.

Agradecimientos

Al proyecto “Aporte de prácticas con enfoque de Agricultura Tropical a la sostenibilidad de los sistemas productivos de aguacate en Tolima y Huila, pasifloras en Boyacá y Meta, y tomate bajo cubierta en Cundinamarca y Boyacá” desarrollado en alianza Asohofrucol y Agrosavia en el marco del convenio 2129 de 2022. Al equipo de Asohofrucol que orientó y acompañó la recolección de información en campo.

Contribución de los autores

K.J.R.R.: Conceptualización, análisis formal, investigación, metodología, supervisión, escritura – borrador original, escritura – revisión y edición. **V.C.P.B.:** Análisis formal, escritura – borrador original, escritura – revisión y edición. **C.A.M.V.:** Análisis formal, escritura – borrador original, escritura – revisión y edición. **D.A.R.R.:** Análisis formal, escritura – borrador original, escritura – revisión y edición. **E.M.E.M.:** Análisis formal, escritura – borrador original, escritura – revisión y edición. **M.C.R.:** Análisis formal, escritura – borrador original, escritura – revisión y edición. **A.P.V.N.:** Análisis formal, escritura – borrador original, escritura – revisión y edición. **Y.R.B.:** Curación de datos, análisis formal, metodología, escritura – borrador original.

Referencias

- Agronet. (2023). *Base agrícola EVA de 2019 a 2022*. Online: <https://n9.cl/3p5a2>
- Agronet. (2024). *Reporte: Área, producción y rendimiento nacional por cultivo*. Online: <https://n9.cl/dhvg>
- Alzate, D. (2020). Concentración de la tierra y las zonas de interés de desarrollo rural, económico y social (Zidres) en los montes de maría, maría la baja y carmen de bolívar. *Prolegómenos*, 23(46), 51–70. Online: <https://doi.org/10.18359/prole.4309.x>
- Asan, Z., y Greenacre, M. (2008). Measures of fit in multiple correspondence analysis of crisp and fuzzy coded data. Online: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.1107815>
- Benton, T., Bieg, C., Harwatt, H., Pudassaini, R., y Wellesley, L. (2021). *Food system impacts on biodiversity loss: Three levers for food system transformation in support of nature*. London, UK: Chatham House. Online: <https://n9.cl/mw42do>
- Berdegue, J. A., y Escobar, G. (2004). *Tecnología y pobreza: opciones para FONTAGRO* (Inf. Téc. n.º A50/6609). Washington, USA: Fondo Regional de Tecnología Agropecuaria. Online: <https://n9.cl/hqny>
- Buitrago, P. (2022). *Pérdida de bosque alto andino por procesos de paramización y cambio climático en ecosistemas de alta montaña*. Online: <https://n9.cl/izq4q>
- Cachipiendo, 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*, 42(2), 41–60. Online: <https://doi.org/10.17163/lgr.n42.2025.03>
- Cano, S., Iregui, B., Ramírez, G., y Tribín, U. (2016). *El desarrollo equitativo, competitivo y sostenible del sector agropecuario en Colombia*. Banco de la República. Online: <https://n9.cl/105td>
- Caro, L., y Cortés, P. (2020). *Estado del arte de los efectos de plaguicidas de uso agrícola para la salud y el ambiente en Colombia (2007-2019)* (Inf. Téc.). Online: <https://n9.cl/0dzrf>
- Clark, C. D., Matarrita-Cascante, D., Tkatch, J. R. V., y Fariha, M. S. (2026). Examining the competitive advantage of nature-based destinations: Applying a holistic resource-based theory framework. *Tourism Management*, 112, 105281. Online: <https://doi.org/10.1016/j.tourman.2025.105281>
- Codron, J. M., Adanacioğlu, H., Aubert, M., Bouhsina, Z., El Mekki, A., Rousset, S., ... Yercan, M. (2014). The role of market forces and food safety institutions in the adoption of sustainable farming practices: The case of the fresh tomato export sector in Morocco and Turkey. *Food Policy*, 49(1), 268–280. Online: <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2014.09.006>
- Conagua. (2013). *Guía de identificación de actores clave. serie: Planeación hidráulica en México* (Inf. Téc.). Ciudad de México: Semarnat. Online: <https://n9.cl/hyudia>

- Congreso de Colombia. (1993). *Ley 101 de 1993. ley general de desarrollo agropecuario y pesquero*. Online: <https://n9.cl/nmiwe> (Colombia)
- Consejo Privado de Competitividad, y SCORE-Universidad del Rosario. (2023). *Índice departamental de competitividad 2023* (Inf. Téc.). Punto Aparte editores. Online: <https://n9.cl/vm0a90>
- Cosgrove, D. (2008). *Geography and vision: Seeing, imagining and representing the world*. London & New York: I.B. Tauris. Online: <https://n9.cl/l2vz>
- Cuellas, M., Amoia, P., y Delmazzo, P. (2019). Efecto de diferentes tratamientos de desinfección del suelo sobre las propiedades edáficas. *Chilean Journal of Agricultural & Animal Sciences*, 35(1), 26–37. Online: <https://doi.org/10.4067/S0719-38902019005000103>
- Departamento Nacional de Planeación. (2023). *Terridata*. DNP. Online: <https://n9.cl/6ghncx>
- Dikinya, O., y Mufwanzala, M. (2010). Chicken manure-enhanced soil fertility and productivity: Effects of application rates. *Journal of Soil Science and Environmental Management*, 1(3), 46–54. Online: <https://n9.cl/hmstw6>
- Délices, G., Ovalle, O., Mota-Vargas, C., Pastrana, R., Pastrana, R., Meza, P., y Serna-Lagunes, R. (2019). Biogeography of tomato *solanum lycopersicum* var. cerasiform (solanaceae) in its center of origin (south america) and domestication (mexico). *Revista de Biología Tropical*, 67(4), 1023–1036. Online: <https://doi.org/10.15517/rbt.v67i4.33754>
- Díaz, G., Hernández, T., y Cabello, R. (2004). Re-seña bibliográfica de la rotación de cultivos, un camino a la sostenibilidad de la producción arrocerá. *Cultivos Tropicales*, 25(3), 19–44. Online: <https://n9.cl/p8yh>
- Díaz-Pinzón, L., Sierra, L., Trillas, F., y Verd, J. (2024). The social-ecological system framework of urban wetlands: The role of collective management at local level. *International Journal of the Commons*, 18(1), 649–669. Online: <https://doi.org/10.5334/ijc.1399>
- Escobedo, A. (2018). *Cadena de valor de café de guatemala* (Inf. Téc.). CATIE. Online: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.32152.65282>
- FAOSTAT. (2023). *Crops and livestock products*. FAO. Online: <https://n9.cl/7wq46>
- Food and Agricultural Organization. (2021). *Experiencias de transición agroecológica en colombia* (Inf. Téc.). Bogotá: Sembrando Capacidades (Cooperación Brasil-Colombia-FAO). Online: <https://n9.cl/8yhif>
- Gamboa, C., Bojacá, C., Schrevens, E., y Martens, M. (2020). Sustainability of smallholder quinoa production in the peruvian andes. *Journal of Cleaner Production*, 264, 121657. Online: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121657>
- Gomez-Jaramillo, Y., Berrouet, L., Villegas-Palacio, C., y Berrio-Giraldo, L. (2024). Navigating water security: A sustainability evaluation in basin socio-ecological systems. the grande river basin case study, antioquia-colombia. *Science of The Total Environment*, 959(10), 178354. Online: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.178354>
- Guerrero, J. (2003). Estudio de residuos de plaguicidas en frutas y hortalizas en áreas específicas de colombia. *Agronomía Colombiana*, 21, 198–209. Online: <https://n9.cl/pix9x>
- Hanf, F., Ament, F., Boettcher, M., Burgemeister, F., Gaslikova, L., Hoffmann, P., ... Wicke, M. (2025). Towards a socio-ecological system understanding of urban flood risk and barriers to climate change adaptation using causal loop diagrams. *International Journal of Urban Sustainable Development*, 17(1), 69–102. Online: <https://doi.org/10.1080/19463138.2025.2474399>
- Herrera-Masó, J., Calero, J., González, M., Collazo, M., y Travieso, Y. (2022). El método de consulta a expertos en tres niveles de validación. *Revista Habanera de Ciencias Médicas*, 21(1), e4711. Online: <https://n9.cl/pc81f>
- Hinkel, J., Cox, M., Schulter, M., Binder, C., y Falk, T. (2015). A diagnostic procedure for applying the social-ecological systems framework in diverse cases. *Ecology and Society*, 20(1), 32. Online: <https://doi.org/10.5751/ES-07023-200132>
- Instituto Colombiano Agropecuario. (2022). *Plan de monitoreo de residuos de plaguicidas químicos en especies vegetales en colombia*. Online: <https://n9.cl/f23dt> (ICA)

- Jaramillo, C. (2019). *Programa de formación continua especializada: Producción agroecológica de frutas y hortalizas* (Inf. Téc.). Corpocyt, Ed. and Asohfrucol. Online: <https://n9.cl/2eokr>
- Jaramillo, J., Sánchez-León, G., Rodríguez, V., Aguilar, P., Gil, L., Hío, J., ... Guzmán-Arroyave, M. (2012). *Tecnología para el cultivo de tomate bajo condiciones protegidas*. Bogotá: Corpoica. Online: <https://n9.cl/uqj1n>
- Johnson, R., y Wichern, D. (2002). *Applied multivariate statistical analysis* (6th ed.). Pearson Modern Classics. Online: <https://n9.cl/6hnmk>
- López, E., Martínez, L., Martínez-Cañas, C., y Vargas-Prieto, A. (2018). Desarrollo rural y envejecimiento: caso de estudio municipio de chinavita, boyacá, colombia. *Revista investigación y desarrollo e innovación*, 8(2), 193–206. Online: <https://doi.org/10.19053/20278306.v8.n2.2018.7959>
- López-Gómez, E. (2018). El método delphi en la investigación actual en educación: una revisión teórica y metodológica. *Educación XX1*, 21(1), 17–40. Online: <https://doi.org/10.5944/educXX1.15536>
- MADS, y MCIT. (2019). *Estrategia nacional de economía circular. cierre de ciclos de materiales, innovación tecnológica, colaboración y nuevos modelos de negocio* (Inf. Téc.). Bogotá D.C., Colombia: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible and Ministerio de Comercio, Industria y Turismo. Online: <https://n9.cl/jx6lxm>
- Martínez, M., y Quintero, J. (2017). Estado actual de los desperdicios de frutas y verduras en Colombia. En *Memorias 4to congreso internacional amitic* (Vol. 1, pp. 194–201). Portal de Revistas Académicas Universidad Tecnológica de Panamá UTP. Online: <https://n9.cl/dbzmi3>
- MAVDT. (2010). *Política nacional de producción y consumo sostenible* (Inf. Téc.). Bogotá: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Online: <https://n9.cl/oo2if>
- McGinnis, M., y Ostrom, E. (2014). Social-ecological system framework: Initial changes and continuing challenges. *Ecology and Society*, 19(2), 1–30. Online: <https://doi.org/10.5751/ES-06387-190230>
- Nagel, B., y Partelow, S. (2022). A methodological guide for applying the social-ecological system (SES) framework: a review of quantitative approaches. *Ecology and Society*, 27(4), 1–39. Online: <https://doi.org/10.5751/ES-13493-270439>
- Olwig, K. (2002). *Landscape, nature and the body politic: From britain's renaissance to america's new world*. Madison, WI: University of Wisconsin Press. Online: <https://doi.org/10.1080/00291950310003043>
- Ostrom, E. (2009). A general framework for analyzing sustainability of social-ecological systems. *Science*, 325(5939), 419–422. Online: <https://doi.org/10.1126/science.1172133>
- Patiño, M., Valencia-Guerrero, M., Barbosa-Ángel, E., Martínez-Cordón, M., y Donado-Godoy, P. (2020). Evaluation of chemical and microbiological contaminants in fresh fruits and vegetables from peasant markets in cundinamarca, Colombia. *Journal of Food Protection*, 83, 1726–1737. Online: <https://doi.org/10.4315/0362-028X/JFP-19-453>
- Preiser, R., Biggs, R., De Vos, A., y Folke, C. (2018). Social-ecological systems as complex adaptive systems: organizing principles for advancing research methods and approaches. *Ecology and Society*, 23(4), 46. Online: <https://doi.org/10.5751/ES-10558-230446>
- Pérez, M. (2020). Retos de la política ambiental colombiana frente a los desafíos de la OCDE y ODS. *Análisis político*, 33(99). Online: <https://doi.org/10.15446/anpol.v33n99.90970> (Mayo-Agosto)
- Pérez-Vázquez, A., Leyva, D., y Gómez, F. (2018). Desafíos y propuestas para lograr la seguridad alimentaria hacia el año 2050. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(1), 175–189. Online: <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i1.857>
- Quiroga, S., Suárez, C., Hernanz, V., Aguiño, J., y Fernández-Manjarrés, J. (2024). Analysing post-conflict policies to enhance socio-ecological restoration among black communities in southern Colombia: Cacao cropping as a win-win strategy. *Forest Policy and Economics*, 163, 103198. Online: <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2024.103198>
- Ramos, A., Alvarado, A., Montenegro, L., y Sandoval, A. (2022). Oportunidades de conservación

- del paisaje rural andino en el suroccidente de tunja, boyacá (colombia). *Revista Mutis*, 12(2). Online: <https://doi.org/10.21789/22561498.1823>
- Rocha, G., Pichimata, M., y Villagran, E. (2021). Research on the microclimate of protected agriculture structures using numerical simulation tools: a technical and bibliometric analysis as a contribution to the sustainability of under-cover cropping in tropical and subtropical countries. *Sustainability*, 13(18), 10433. Online: <https://doi.org/10.3390/SU131810433>
- Rodríguez-Gonzalez, P., Rico-Martinez, R., y Rico-Ramirez, V. (2020). Effect of feedback loops on the sustainability and resilience of human-ecosystems. *Ecological Modelling*, 426. Online: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2020.109018>
- Rodríguez, T., Reu, B., Bolívar-Santamaría, S., Cortés-Aguilar, A., y Buendía, C. (2023). A framework for participatory scenario planning to guide transitions towards sustainability in mountain social-ecological systems: A case study from the colombian andes. *Land Use Policy*, 132, 106817. Online: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2023.106817>
- Rodríguez-Robayo, K., Pulido-Blanco, V., Rojas-Ramírez, D., y Martínez-Camelo, F. (2022). Buenas prácticas agrícolas y sostenibilidad del cultivo de cebolla de rama (*Allium fistulosum* L.) en la cuenca del lago de tota (boyacá, colombia). *Revista Agroalimentaria*, 28(2407-2022-909), 139–169. Online: <https://n9.cl/ivo4q>
- Ríos, O., Chávez, J., y Carrillo, J. (2014). Producción tradicional y diversidad de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) nativo: un estudio de caso en tehuantepec-juchitán, méxico. *Agricultura Sociedad y Desarrollo*, 11(1), 35–5. Online: <https://n9.cl/pgdegn>
- Tittonell, P. (2019). Las transiciones agroecológicas: múltiples escalas, niveles y desafíos. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional del Cuyo*, 51(1), 231–246. Online: <https://n9.cl/p49jpl>
- Torres-Carral, G. (2021). Acerca del concepto de socioecosistema. un análisis eco-social. *Textual*, 77, 89–114. Online: <https://doi.org/10.5154/r.textual.2021.77.03>
- Valentín, A., Guerrero, A., y Condori, L. (2021). Identificación de residuos de contaminantes químicos en tomate para determinar su grado de toxicidad. *Journal Boliviano de Ciencias*, 17(Especial), 38–52. Online: <https://doi.org/10.52428/20758944.v17iespecial.5>
- Vargas-Hernández, J. (2013). La teoría de recursos y capacidades y el emprendimiento: caso de una microempresa agropecuaria rural. *Voxpopuli*(12), 81–88. Online: <https://n9.cl/qyan5>
- Villagran, E., y Bojacá, C. (2021). Three-dimensional numerical simulation of the thermal and aerodynamic behavior of a roof structure built on a slope and used for horticultural production. *Comunicata Scientiae*, 12, e3593. Online: <https://n9.cl/ayxkgs>
- Villagran, E., Bojacá, C., y Akrami, M. (2021). Contribution to the sustainability of agricultural production in greenhouses built on slope soils: A numerical study of the microclimatic behavior of a typical colombian structure. *Sustainability*, 13(9), 4748. Online: <https://doi.org/10.3390/su13094748>
- Wezel, A., Bellon, S., Doré, T., Francis, C., Vallod, D., y David, C. (2009). Agroecology as a science, a movement and a practice. a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 29(4), 503–515. Online: <https://doi.org/10.1051/agro/2009004>



VARIABILIDAD METEOROLÓGICA Y SU IMPACTO EN LAS ACTIVIDADES AGROPECUARIAS DE LA AMAZONÍA ECUATORIANA EN PASTAZA (2011–2021)

METEOROLOGICAL VARIABILITY AND ITS IMPACT ON AGRICULTURAL ACTIVITIES IN THE ECUADORIAN AMAZON IN PASTAZA (2011–2021)

Brigitte Leiva-Zuñiga , Julia Maza-Valladolid  y Reni Vinocunga-Pillajo * 

Facultad de Ciencias de la Vida, Universidad Estatal Amazónica, 160101, Puyo, Ecuador. [https://ror.org/029ss0s83]

*Autor para correspondencia: rd.vinocungap@uea.edu.ec

Manuscrito recibido el 11 de abril de 2025. Aceptado, tras revisión el 09 de diciembre de 2025. Publicado el 1 de marzo de 2026.

Resumen

Las variaciones en las condiciones climáticas del cantón Pastaza han generado efectos significativos en la productividad agrícola y ganadera, comprometiendo la seguridad alimentaria local. El propósito del estudio es analizar cómo las variables climáticas influyen sobre los principales cultivos y la producción pecuaria entre 2011 y 2021. Se aplicó una metodología de tipo aplicada, con diseño no experimental, nivel descriptivo-correlacional y enfoque transversal. Los datos se obtuvieron de registros meteorológicos del INAMHI y del Sistema de Información Pública Agropecuaria, considerando variables como temperatura media, precipitación total, humedad relativa y evaporación potencial. Los resultados revelaron temperaturas promedio mensuales entre 20,63 °C y 22,06 °C, adecuadas para el plátano y la yuca, pero inferiores al rango óptimo del cacao. La precipitación alcanzó 508,70 mm en mayo, generando encharcamiento en café y caña de azúcar, mientras que en septiembre (285,35 mm) se observó déficit hídrico. Los niveles de humedad relativa (85,00%–89,36%) incrementaron la incidencia de enfermedades fúngicas y los costos de manejo, mientras que la evaporación potencial (54,16 mm–89,57 mm) redujo la humedad del suelo, afectando cultivos como la piña. En la ganadería, los meses de junio y julio presentaron condiciones térmicas favorables y evaporación equilibrada, manteniendo la disponibilidad de pastos. Se concluye que el plátano y la yuca mostraron mayor adaptación a la variabilidad climática, mientras el cacao, café, caña de azúcar y piña evidenciaron reducciones en productividad asociadas a lluvias irregulares y humedad elevada.

Palabras clave: Evaporación, ganadería, humedad, precipitación, resiliencia.

Abstract

The climatic variability observed in Pastaza Canton has significantly affected agricultural and livestock productivity, compromising local food security. This study aims to analyze how climatic variables influence the main crops and livestock production between 2011 and 2021. An applied, non-experimental, descriptive-correlational, and cross-sectional methodology was used. Data were obtained from INAMHI meteorological records and the Public Agricultural Information System, considering variables such as mean temperature, total precipitation, relative humidity, and potential evaporation. Results showed that average monthly temperatures (20.63 °C–22.06 °C) were favorable for banana and cassava but below the optimal range for cocoa. Total precipitation reached 508.70 mm in May, causing waterlogging in coffee and sugarcane crops, whereas September (285.35 mm) showed water deficits. Relative humidity levels (85.00%–89.36%) increased fungal disease incidence and management costs, while potential evaporation (54.16 mm–89.57 mm) reduced soil moisture, affecting pineapple crops. In livestock systems, June and July presented favorable thermal conditions, and balanced evaporation in February maintained adequate pasture availability. Overall, banana and cassava exhibited greater adaptation to climatic variability, while cocoa, coffee, sugarcane, and pineapple showed productivity reductions associated with irregular rainfall and high humidity.

Keywords: Evaporation, livestock, humidity, precipitation, resilience.

Forma sugerida de citar: Leiva-Zuñiga, B., Maza-Valladolid, J. y Vinocunga-Pillajo, R. (2026). Variabilidad meteorológica y su impacto en las actividades agropecuarias de la Amazonía ecuatoriana en Pastaza (2011–2021). *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*. Vol. 43(1):100-116. <https://doi.org/10.17163/lgr.n43.2026.05>.

Orcid IDs:

Brigitte Thalia Leiva Zuñiga: <https://orcid.org/0009-0009-6388-8653>
Julia Maritza Maza Valladolid : <https://orcid.org/0009-0002-2298-3119>
Reni Danilo Vinocunga-Pillajo : <https://orcid.org/0000-0001-6698-7846>

1 Introducción

Según la Organización Meteorológica Mundial, el clima se define como el promedio y la variabilidad de variables meteorológicas como la temperatura, las precipitaciones y el viento en una región específica durante un período de 30 años (Rosvold, 2021). A nivel global, las condiciones meteorológicas han mostrado fluctuaciones significativas con un aumento de 0,74 °C en la temperatura media global durante el último siglo (Shah y cols., 2019). Estas variaciones han generado impactos relevantes en la agricultura, donde la sequía representa más del 80% del total de daños y pérdidas en el sector agropecuario, afectando particularmente los subsectores de producción de ganado y cultivos (Hernández y cols., 2018).

A nivel regional, las fluctuaciones meteorológicas han causado una disminución entre el 20% y el 40% en los rendimientos de cereales y leguminosas debido al estrés hídrico, mientras que cultivos como el arroz han sufrido pérdidas de hasta el 92% en condiciones extremas de sequía (Kumar y cols., 2022; Lal, 2021). En Colombia, las condiciones ambientales entre 2010 y 2011 generaron la pérdida de 1.000.000 de hectáreas de cultivos con un impacto económico total en el sector agropecuario valorado en \$759,893 millones, incluyendo la muerte de 160,965 animales de producción (Arteaga y Burbano, 2018).

Ecuador, conocido por su diversidad climática y productiva, enfrenta desafíos cada vez mayores en el sector agropecuario debido a la variabilidad y los cambios en las condiciones meteorológicas (García-Rengifo y Durán-Ballén, 2023). Según Vásquez-Dávila y Bravo-Benavides (2023), la relación entre la temperatura, precipitación y producción agrícola es significativa respecto a los impactos a largo plazo si estas variables superan los niveles óptimos.

En el caso del cantón Pastaza, que depende ampliamente de actividades agropecuarias, la variación climática ha provocado fluctuaciones en los rendimientos agrícolas, afectando la productividad y la sostenibilidad económica de las comunidades rurales. Por lo tanto, es necesario identificar, analizar y comprender las variables climáticas para predecir cómo han evolucionado las condiciones meteorológicas (Singh y cols., 2023). Esto permitirá

proponer medidas de adaptación específicas, esenciales para mitigar los impactos negativos en las actividades agropecuarias. Además, es necesario en la actualidad diseñar estrategias que fortalezcan la resiliencia agropecuaria y aseguren la sostenibilidad económica y alimentaria (Sgroi, 2023).

Los productores agropecuarios del cantón Pastaza serán los principales beneficiarios del estudio sobre la variación de las condiciones meteorológicas y su impacto en las actividades agropecuarias, por lo que contar con información precisa les permitirá ajustar sus prácticas de manejo en función de las condiciones climáticas, optimizando así sus procesos productivos. De igual manera, las instituciones gubernamentales y académicas podrán utilizar esta información para planificar y tomar decisiones estratégicas en el ámbito agroambiental, facilitando el diseño de estrategias de adaptación y mitigación frente a los cambios climáticos.

El principal problema identificado radica en la falta de datos precisos sobre las variaciones climáticas, lo que dificulta la gestión eficiente de las actividades agropecuarias en la provincia de Pastaza. Las alteraciones en las precipitaciones y el incremento de la temperatura han afectado cultivos esenciales como la caña de azúcar, que es una fuente relevante de ingresos locales (Valle y cols., 2021). De igual forma, la disminución en la disponibilidad de pastos ha impactado negativamente en la producción ganadera, especialmente en la lechera (Mosquera Ponce y cols., 2024). Según Bilali y cols. (2020), estas variaciones climáticas modifican los ciclos productivos, elevan los costos de producción y reducen los rendimientos, lo que compromete la seguridad alimentaria y la estabilidad económica de los pequeños productores.

Estudios previos sobre la temática permiten identificar a autores como Pujahari y cols. (2022), quienes aplicaron previsiones meteorológicas junto con tecnologías como el Internet de las Cosas (IoT), redes de sensores inalámbricos y aprendizaje automático, permitiendo a los agricultores optimizar el riego, la fertilización y el control de plagas. Mientras, Gowtham y cols. (2018) respaldaron las predicciones meteorológicas con modelos avanzados como el Sistema de Soporte para la Transferencia de Agrotecnología (DSSAT), contribuyendo a una planificación agropecuaria más eficiente y adaptativa.

Por su parte, Ordoñez y cols. (2022) desarrollaron modelos agroclimáticos combinados con pronósticos estacionales, logrando una precisión del 80% en la predicción de rendimientos y reduciendo el riesgo climático para los agricultores, lo que a su vez mejoró la productividad.

Atendiendo las premisas anteriores, el objetivo del presente trabajo es estudiar la variación de las condiciones meteorológicas y su impacto en las actividades agropecuarias en el cantón Pastaza durante el período 2011–2021.

2 Materiales y Métodos

La metodología se desarrolló de forma secuencial, iniciando con la delimitación del área de estudio, la definición del tipo de investigación, la determi-

nación del período de estudio, muestra y fuente de datos, seguida del procesamiento junto con el análisis estadístico. Este orden metodológico garantiza la replicabilidad del procedimiento y la verificación de los resultados obtenidos.

2.1 Localización

El presente estudio se realizó en el cantón Pastaza en las instalaciones del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI). Este cantón pertenece a la provincia Pastaza, que abarca una extensión de 29.643,33 km² y limita al norte con las provincias de Napo y Orellana, al sur con Morona Santiago, al este con la República del Perú y al oeste con Tungurahua (Gobierno Provincial de Pastaza, 2020). Esta provincia se caracteriza por un clima tropical húmedo que favorece las actividades agropecuarias y su análisis en relación con las variables climáticas (Figura 1).

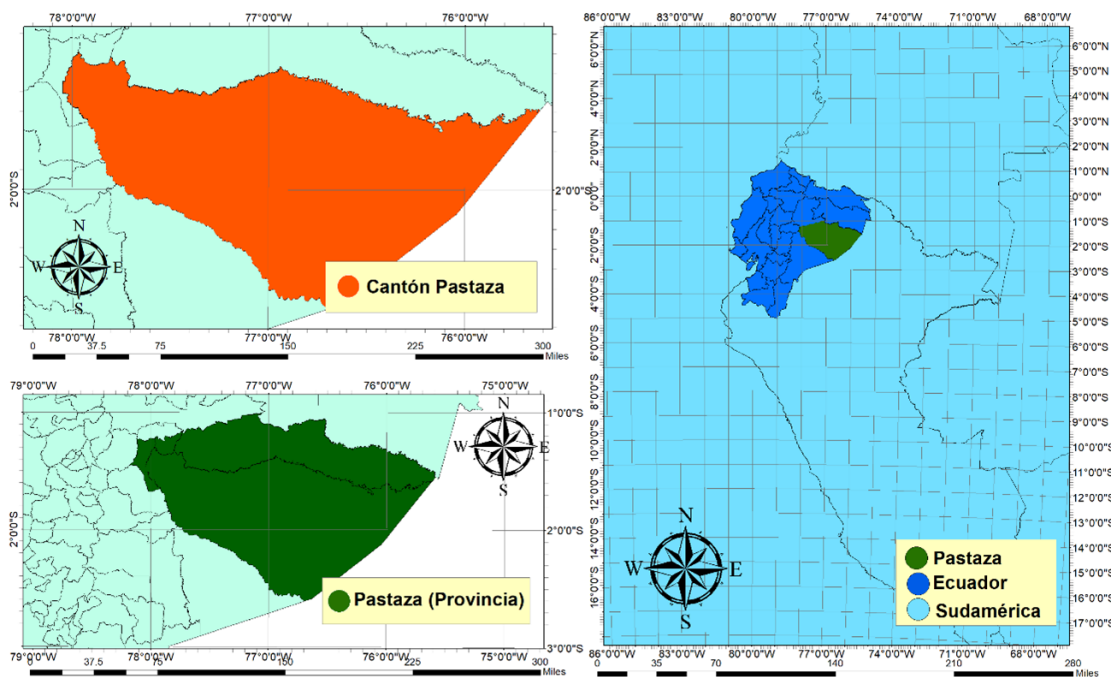


Figura 1. Ubicación geográfica de la zona de estudio.

2.2 Tipo de investigación

El estudio adoptó un enfoque cuantitativo, con un diseño no experimental, de nivel descriptivo-correlacional y transversal, que permitió examinar

las variables climáticas del cantón Pastaza durante el período de análisis (Cvetkovic-Vega y cols., 2021). Este diseño permitió analizar y describir las variables climáticas del cantón Pastaza durante el período de estudio.

2.3 Período de estudio, muestra y fuente de datos

El análisis se fundamentó en los registros comprendidos entre los años 2011 y 2021, correspondientes al último período disponible en los archivos del INAMHI. Este intervalo temporal permitió identificar las variaciones interanuales en las condiciones climáticas y su relación con las actividades agropecuarias del cantón Pastaza.

La información se obtuvo de la estación meteorológica "Pastaza" (INAMHI), ubicada a 1.060 m.s.n.m, seleccionada por la continuidad y confiabilidad de sus registros, así como por su representatividad respecto al comportamiento agroclimático local. Al tratarse de una estación sinóptica acreditada, sus mediciones de temperatura, precipitación, humedad relativa y evaporación potencial cumplen con los estándares técnicos de precisión establecidos por la World Meteorological Organization (2021).

Se aplicaron procedimientos de control de calidad siguiendo las recomendaciones de la World Meteorological Organization (2010), que incluyen la revisión de coherencia interna, la detección de valores extremos mediante límites climatológicos y la comparación cruzada con estaciones cercanas y promedios históricos. Los registros inconsistentes fueron verificados y corregidos o, en su defecto, excluidos del análisis para garantizar la integridad de las series temporales.

2.4 Variables analizadas

El análisis de las variables se desarrolló considerando los aspectos climáticos y agropecuarios vinculados con las actividades productivas en el cantón Pastaza. En el ámbito agropecuario, se incluyeron variables como la superficie plantada (ha), superficie cosechada (ha), producción (t) y rendimiento (t/ha) de los cultivos, así como la población total de ganado, considerando las categorías de vacuno, porcino, ovino, caballar y mular. Estas variables permiten comprender el nivel productivo, el desempeño agrícola y pecuario en la zona de estudio, lo cual resulta esencial para establecer su relación con las variables climáticas.

La temperatura media mensual influye en el desarrollo fisiológico de los cultivos, ya que cada especie requiere un rango térmico adecuado para su crecimiento. Además, la temperatura impacta en el confort térmico del ganado, donde variaciones extremas pueden provocar estrés y reducir la productividad (González Osorio y cols., 2020).

La precipitación total mensual determina la disponibilidad de agua para los cultivos y forrajes, siendo necesaria para garantizar un desarrollo adecuado. Un déficit hídrico limita el crecimiento y la calidad de los productos, mientras que el exceso puede generar problemas de encharcamiento y enfermedades (Paliz y cols., 2021).

La humedad relativa media mensual propicia la aparición de enfermedades fitosanitarias. Los elevados niveles de humedad favorecen el desarrollo de hongos y bacterias, reduciendo la calidad de la producción agrícola (Pozo-Santiago y cols., 2020).

La evaporación potencial media mensual influye directamente en la demanda de agua para riego, ya que en períodos de alta evaporación se requiere un mayor suministro hídrico para prevenir el estrés en los cultivos y garantizar su desarrollo óptimo (Monterroso-Rivas y Gómez-Díaz, 2021).

2.5 Procesamiento de datos

El procesamiento incluyó medidas de dispersión y coeficiente de variación, con el propósito de cuantificar la variabilidad interanual. El análisis estadístico se ejecutó en Microsoft Excel® (versión 2021) mediante correlaciones de Pearson ($p < 0,05$) y regresiones lineales simples, aplicadas únicamente cuando el coeficiente de correlación r superó 0,50 (50%). En ausencia de correlaciones significativas, se efectuó un análisis descriptivo comparativo entre las variables, que permitió interpretar comportamientos climáticos locales y contrastarlos con antecedentes de regiones tropicales húmedas.

2.6 Limitaciones metodológicas

El estudio se basó en registros de una única estación meteorológica, lo que restringe el análisis espacial. El período de 11 años constituye una escala interanual que describe la variabilidad reciente, sin alcanzar la extensión temporal requerida para los es-

tudios climáticos de largo plazo. No obstante, este enfoque es adecuado para caracterizar las condiciones meteorológicas locales y su incidencia sobre las actividades agropecuarias del cantón Pastaza.

3 Resultados y Discusión

3.1 Actividades agropecuarias

Las principales actividades agropecuarias, según el Sistema de Información Pública Agropecuaria

(2024), corresponden a los cultivos de plátano y yuca, que registran mayor superficie y producción durante el año 2024 (Tabla 1). El plátano registra 3 439 ha plantadas, 2 554 ha cosechadas y 15 096 toneladas con un rendimiento de 5,91 t/ha. La yuca, con 1 999 ha plantadas y 4 281 toneladas, alcanza un rendimiento de 2,21 t/ha. La piña sobresale por su rendimiento de 9,86 t/ha, mientras que cultivos como el cacao y el café presentan menores niveles, con 0,3 y 0,58 t/ha, respectivamente.

Tabla 1. Producción, superficie y rendimiento de cultivos agrícolas durante el año 2024.

Producto	Sup. Plantada (ha)	Sup. Cosechada (ha)	Producción (t)	Rendimiento (t/ha)
Plátano	3 439	2 554	15 096	5,91
Yuca	1 999	1 937	4 281	2,21
Maíz duro seco	282	282	253	0,90
Caña de azúcar para otros	192	183	1 044	5,71
Piña (fruta fresca)	166	125	1 231	9,86
Cacao	110	61	19	0,30
Café	69	69	40	0,58
Banano	64	64	273	4,28
Maní (grano descascarado)	49	49	27	0,55
Limón (fruta fresca)	40	35	51	1,45
Naranja	35	35	61	1,75
Fréjol tierno	11	11	11	0,95

Según el Sistema de Información Pública Agropecuaria (2024), el ganado vacuno, con 3 722 314 animales, representa la mayor cantidad dentro del sector pecuario. Le siguen el ganado porcino, con 983 999 animales, y el ovino, con 561 949. Los equinos están divididos entre caballos, con 143 310 animales, y mulas, que constituyen la menor proporción con 54 044 animales (Tabla 2).

Tabla 2. Población de ganado durante el año 2024.

Tipo de ganado	Cantidad de animales
Vacuno	3 722 314
Porcino	983 999
Ovino	561 949
Caballos	143 310
Mulas	54 044

Fuente: Sistema de Información Pública Agropecuaria (2024).

3.2 Influencia de la temperatura media en las actividades agropecuarias

El plátano tiene un rango óptimo de 22 °C a 30 °C y puede desarrollarse en temperaturas de 20 °C a 35 °C (Zambrano y cols., 2021). En Pastaza, las temperaturas promedio mensuales (20,63 °C a 22,06 °C) están muy cerca del límite inferior del rango óptimo (Figura 2). Los meses como mayo (21,45 °C) y septiembre (21,58 °C) son ideales para este cultivo, ya que favorecen el crecimiento del pseudotallo y el llenado de los frutos (Cedeño García y cols., 2021). Incluso en meses como junio (20,94 °C) y octubre (21,99 °C), las temperaturas no representan una amenaza significativa para el desarrollo del cultivo; no hay un impacto negativo evidente en el plátano. Las temperaturas promedio de Pastaza son adecuadas para garantizar el rendimiento actual de 5,91 t/ha, mostrando un desarrollo regular del cultivo.

El cacao prospera en un rango óptimo de 24 °C a 28 °C y tolera temperaturas de 15 °C a 32 °C (Ferrer-Sánchez y cols., 2022). En Pastaza, las temperaturas promedio mensuales (20,63 °C a 22,06 °C) están por debajo del rango óptimo, pero aún dentro del rango tolerable (Figura 2). Este desajuste podría limitar ligeramente la floración y el cuajado de frutos (Garay-Peralta y cols., 2024). Meses como abril (21,62 °C) y septiembre (21,58 °C) ofrecen mejores condiciones para su desarrollo, aunque no alcanzan el rango óptimo requerido. El cacao muestra un impacto moderado debido a temperaturas que no llegan al rango óptimo según Castillo y cols. (2024). Esto explica su bajo rendimiento de 0,30 t/ha, y aunque el cultivo puede sobrevivir en estas condiciones, su productividad está lejos de ser ideal.

La yuca prospera en un rango óptimo de 25 °C a 29 °C y tolera temperaturas de 18 °C a 35 °C (Rosero y cols., 2024). En Pastaza, todas las temperaturas promedio mensuales (20,63 °C a 22,06 °C) se encuentran dentro del rango tolerable, aunque levemente por debajo del rango óptimo. Esto implica que el cultivo puede desarrollarse adecuadamente en todas las épocas del año (Monsanto y cols., 2020). Los meses como febrero (21,40 °C) y abril (21,62 °C) son particularmente favorables, ya que se acercan al límite inferior del rango óptimo (Figura 2). No se observa un impacto negativo significativo en el rendimiento de la yuca, ya que las temperaturas se mantienen dentro del rango tolerable. El rendimiento actual de 2,21 t/ha es consistente con estas condiciones climáticas. Sin embargo, una temperatura más cercana al rango óptimo podría incrementar ligeramente la productividad.

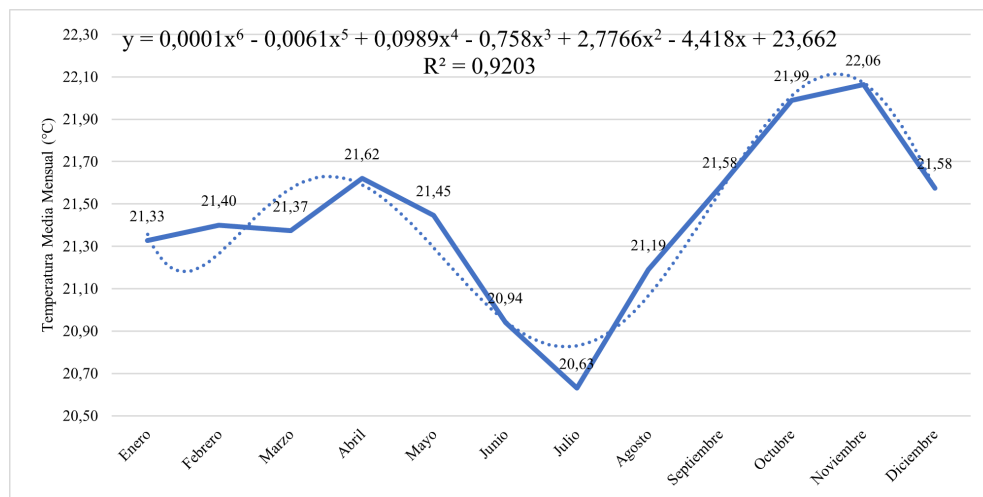


Figura 2. Temperatura media mensual durante el período 2011-2021.

La ganadería, dominada por el ganado vacuno con 3 722 314 animales, también muestra una dependencia crítica de la temperatura. Los meses más cálidos, como octubre (21,99 °C) y noviembre (22,06 °C), generan estrés térmico en el ganado, afectando su ingesta de alimento y productividad, como lo indica Midence y Blas (2024). Por otro lado, las temperaturas más frescas de junio (20,94 °C) y julio (20,63 °C) pueden limitar el crecimiento de pastos naturales (Cárdenas y Telles, 2023), reduciendo la disponibilidad de forrajes esenciales para la alimentación del ganado.

Las variaciones espaciales y temporales de la precipitación en Pastaza indican un patrón altamente dependiente de la topografía y la cobertura vegetal, lo que genera contrastes entre zonas de llanura y piedemonte. Este comportamiento coincide con Cargua y cols. (2024), quienes señalan que los gradientes climáticos locales condicionan la respuesta del suelo y la estabilidad ambiental en regiones amazónicas y andinas. De igual manera, Hidalgo y cols. (2024) evidenciaron que los cambios en la pluviosidad y temperatura influyen directamente en los procesos hidrológicos y ecológicos de montaña. En el contexto agropecuario de Pastaza, estas varia-

ciones determinan la disponibilidad hídrica para los cultivos de plátano, yuca y cacao.

3.3 Variabilidad de la precipitación y su efecto en los cultivos de Pastaza

La caña de azúcar depende de un suministro constante de agua, idealmente entre 1 500 y 2 500 mm anuales, distribuidos de manera uniforme (Díaz Serna, 2024; Espinel Rubio y Feo-Ardila, 2022). En Pastaza, meses como mayo (508,70 mm) y abril (450,94 mm) aseguran niveles hídricos adecuados para la acumulación de sacarosa en los tallos (Figura 3). Sin embargo, los meses secos como septiembre (285,35 mm) pueden afectar el crecimiento del cultivo y su rendimiento. Esto coincide con Misra y cols. (2020), quienes destacan que la irregularidad en las lluvias genera estrés hídrico en cultivos de alta demanda hídrica como la caña.

La precipitación en Pastaza resulta adecuada durante los meses húmedos; sin embargo, su distri-

bución irregular limita el rendimiento promedio de la caña de azúcar a 5,71 t/ha. De acuerdo con Santiago Zárate y cols. (2021), el rendimiento promedio por hectárea de caña de azúcar es de 8,26 toneladas, con un máximo registrado de 16,54 toneladas. Esto indica que la implementación de sistemas de riego suplementario y prácticas agrícolas optimizadas podría contribuir a mejorar significativamente el rendimiento de este cultivo.

La piña prospera en un rango de precipitación anual entre 1 000 y 1 500 mm, con requerimientos mensuales de 50 a 125 mm (Aguilera-Arango y cols., 2022). En Pastaza, meses como abril (450,94 mm) y mayo (508,70 mm) exceden ampliamente este rango mensual (Figura 3), lo que podría generar un crecimiento vegetativo excesivo y retrasar la floración según Bonet-Pérez y cols. (2021). Por otro lado, los meses más secos como julio (314,90 mm) y septiembre (285,35 mm) también superan el límite máximo mensual necesario para este cultivo.

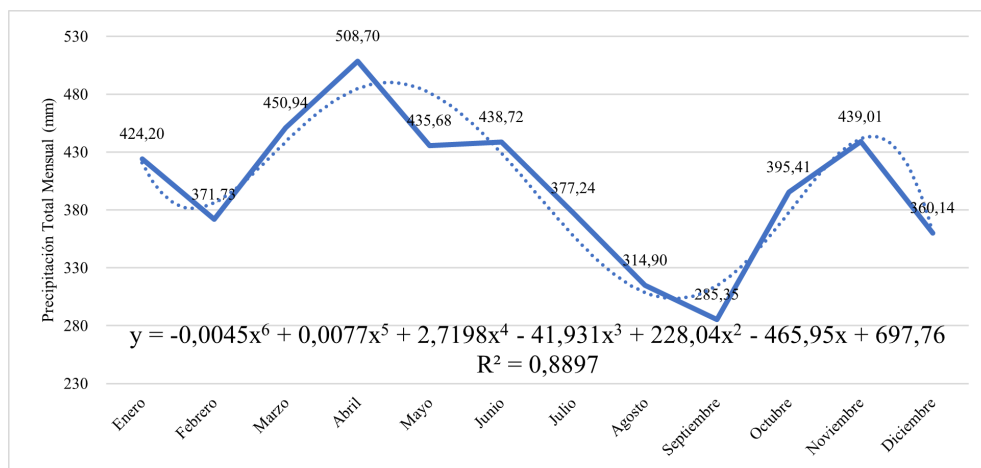


Figura 3. Precipitación total mensual durante el período 2011-2021.

La precipitación en Pastaza, aunque adecuada en cantidad, supera los niveles óptimos recomendados para el cultivo de piña durante todos los meses analizados (Figura 3). Este exceso afecta significativamente el rendimiento, que se sitúa en 9,86 t/ha, mientras que según Vélez-Izquierdo y cols. (2020), el rendimiento promedio esperado para este cultivo es de 20 t/ha. Por lo tanto, hay que implementar medidas de manejo hídrico, como sistemas de dre-

naje eficientes y estrategias de riego controlado, para mitigar los efectos del exceso de agua y optimizar las condiciones del cultivo, favoreciendo así un incremento en el rendimiento.

El café requiere una precipitación anual de 1 200 a 2 000 mm, con lluvias distribuidas uniformemente y valores mensuales ideales de 100 a 200 mm para evitar estrés hídrico prolongado (Parada-Molina

y cols., 2020). En Pastaza, los meses como mayo (508,70 mm) y noviembre (439,01 mm) exceden considerablemente el rango mensual óptimo (Figura 3), lo que podría generar problemas de encharcamiento, afectando la calidad del grano (Quiroz Guerrero y cols., 2024). Por otro lado, los meses más secos como julio (314,90 mm) y septiembre (285,35 mm), aunque superan el límite superior mensual ideal, cumplen con las necesidades mínimas del cultivo.

Las precipitaciones en Pastaza están por encima del rango mensual óptimo para el café en todos los meses analizados, lo que genera un impacto negativo en la calidad del grano por exceso de humedad. Esto explica el bajo rendimiento de 0,58 t/ha, consistente con Parada-Molina y cols. (2020), quienes afirman que las lluvias excesivas pueden interferir en el llenado de granos y reducir su calidad.

El crecimiento de pastos requiere un rango óptimo de precipitaciones entre 300 y 400 mm mensuales (Brenes Gamboa, 2018). En Pastaza, aunque los meses como mayo (508,70 mm) y noviembre (439,01 mm) superan este rango (Figura 3), otros como septiembre (285,35 mm) se encuentran en el límite inferior, lo que puede afectar la producción de forrajes. Estas variaciones en la disponibilidad de agua incrementan los costos operativos debido al uso de suplementos alimenticios y reducen la rentabilidad ganadera (Viera González y cols., 2023).

La precipitación en Pastaza mantiene niveles adecuados para la producción agrícola, aunque su distribución irregular genera impactos diferenciados según el tipo de cultivo. Las lluvias intensas prolongadas favorecen la acumulación hídrica necesaria para la caña de azúcar, pero exceden los requerimientos óptimos de la piña y el café, ocasionando pérdidas en la floración y calidad del grano. Este comportamiento coincide con Mestanza Uquillas y cols. (2025), quienes demostraron que la alternancia entre épocas secas y lluviosas en la costa central del Ecuador modifica la productividad de los cultivos en función del régimen pluvial y la adaptabilidad de las especies. De forma complementaria, Quiroz Antunez y cols. (2022) evidenciaron que la disponibilidad irregular de las lluvias altera la aptitud de los cultivos de café y cacao ante los escenarios de variabilidad climática, afectando su desarrollo fenológico. En consecuencia, la estabilidad de la producción agropecuaria en Pastaza depende de

un manejo hídrico eficiente que permita compensar los efectos de la variabilidad pluviométrica sobre la productividad local.

3.4 Humedad relativa en la productividad agropecuaria de Pastaza

La humedad relativa media mensual en Pastaza se encuentra entre 85,00% y 89,36%, generando impactos significativos en los cultivos y la ganadería (Figura 4). Durante los meses de mayor humedad relativa, como marzo (89,36%) y abril (88,40%), se incrementa la incidencia de enfermedades fúngicas como *Moniliophthora perniciosa* y *Hemileia vastatrix* en cultivos como el cacao y el café (Santiago-Elena y cols., 2020). Según Mamani-Huayhua y cols. (2021), estos patógenos afectan directamente la productividad. Este impacto negativo se debe a que las humedades relativas superiores crean un ambiente óptimo para el desarrollo y dispersión de estos organismos (Lopez y cols., 2021). La implicación principal radica en el incremento de los costos de manejo fitosanitario y la disminución de los rendimientos agrícolas, comprometiendo la sostenibilidad económica de los agricultores locales.

En contraste, durante los meses de menor humedad relativa, como septiembre (85,00%) y octubre (86,33%), los niveles descienden al límite mínimo tolerable para la mayoría de los cultivos (Figura 4). Aunque esto reduce el riesgo de algunas enfermedades fúngicas, no elimina por completo su presencia. Según Duran y cols. (2021), estos descensos pueden generar problemas asociados al estrés hídrico en cultivos sensibles a la humedad, afectando su crecimiento. Por lo tanto, si bien los cultivos se benefician de menores niveles de humedad relativa, aún se requiere un manejo adecuado para mitigar los efectos adversos en la productividad.

En los sistemas ganaderos, las humedades relativas elevadas promueven la aparición de infecciones respiratorias, dérmicas y parasitarias en animales como el ganado vacuno y porcino. Estos problemas pueden presentarse entre marzo y junio, donde los niveles superan consistentemente el 88% (Figura 4). De acuerdo con Conejo-Morales y Wing Ching (2020), estas condiciones adversas se deben a la acumulación de humedad en los corrales, dificultando la ventilación y aumentando los niveles de amoníaco en el aire. La principal implicación de este

fenómeno es la disminución de la ingesta alimenticia de los animales, reduciendo su productividad y elevando los costos operativos debido a tratamientos veterinarios y suplementos alimenticios.

Los meses con menor humedad relativa, como septiembre y octubre, ofrecen cierto alivio para los sistemas ganaderos al reducirse las infecciones respiratorias y la humedad en los corrales (Figura 4).

Sin embargo, estas condiciones también pueden limitar el crecimiento de pastos, que son una fuente primaria de alimento para el ganado. Según Alvarado Irías y Colon García (2023), esto implica que, aunque los animales experimentan menos estrés térmico, los productores enfrentan el desafío de suplir la falta de forraje natural con alimentos suplementarios, incrementando los costos.

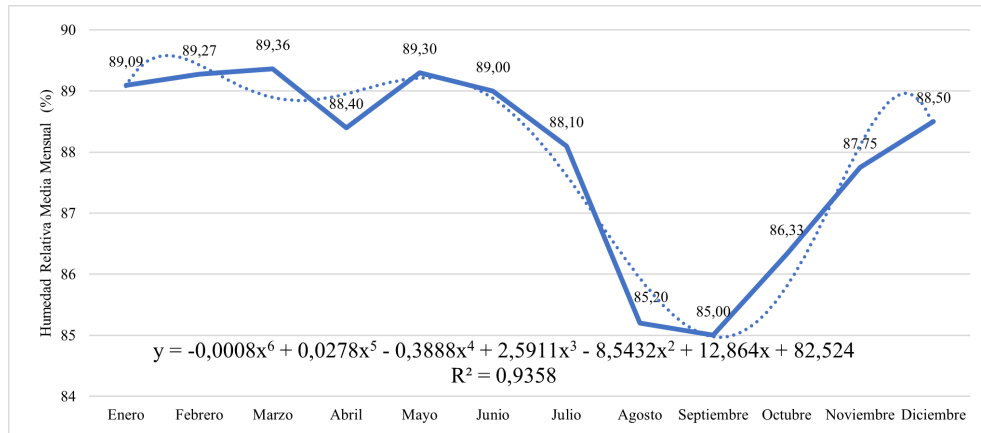


Figura 4. Humedad relativa media mensual durante el período 2011-2021.

Los valores elevados de humedad relativa observados en Pastaza confirman una condición atmosférica constante que favorece el desarrollo de enfermedades fúngicas y la proliferación de microorganismos que afectan la fisiología vegetal y animal. De acuerdo con Bibi y Rahman (2023), este tipo de ambiente limita la transpiración foliar y altera los procesos metabólicos de los cultivos, reduciendo su eficiencia fotosintética. En concordancia, Vásquez y cols. (2024) evidenciaron que los niveles de humedad superiores al 85% en condiciones tropicales incrementan la incidencia de plagas y enfermedades, reduciendo la estabilidad productiva de los sistemas agrícolas. Por tanto, el control de la humedad relativa mediante prácticas de manejo microclimático y ventilación controlada en zonas de cultivo se presenta como una alternativa viable para reducir las pérdidas y mantener la sostenibilidad agropecuaria en la región amazónica ecuatoriana.

3.5 Evaporación potencial en la disponibilidad hídrica de cultivos en Pastaza

La evaporación potencial media mensual en Pastaza varía entre 54,16 mm en febrero y 89,57 mm en septiembre (Figura 5). La alta evaporación incrementa la pérdida de humedad en el suelo, reduciendo significativamente la disponibilidad hídrica para cultivos como el plátano, la yuca, la caña de azúcar y la piña. Durante los meses de agosto y septiembre, con valores que superan los 80 mm, los agricultores enfrentan un aumento en las necesidades de riego para mantener un nivel adecuado de humedad en el suelo. Según Misra y cols. (2020), la alta evaporación puede limitar la capacidad de los cultivos para absorber nutrientes y realizar procesos clave como la fotosíntesis, lo que resulta en un menor rendimiento.

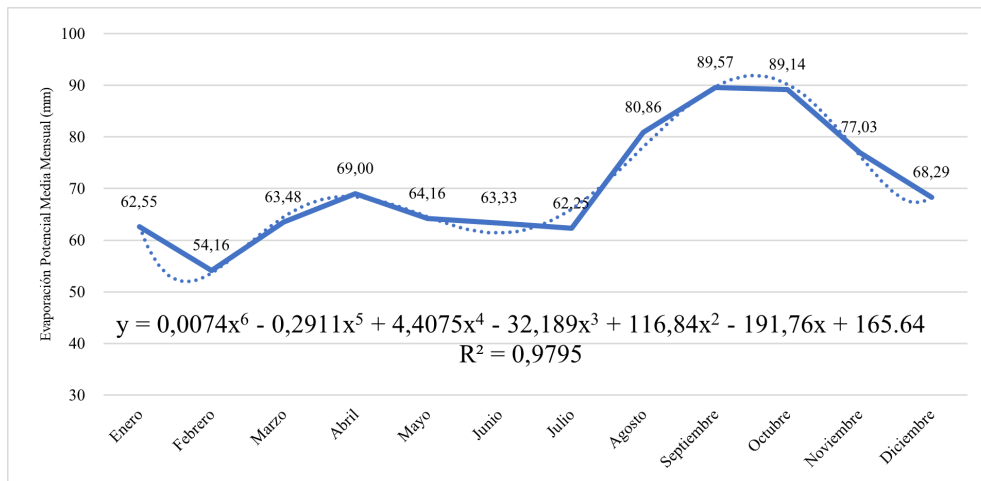


Figura 5. Evaporación potencial media mensual durante el período 2011-2021.

En la caña de azúcar, este fenómeno impacta directamente la acumulación de sacarosa en los tallos, reduciendo su calidad y productividad. Asimismo, en la piña, el estrés hídrico causado por la evaporación elevada puede retrasar la floración y disminuir el tamaño del fruto (Coelho y cols., 2024). Estos efectos subrayan la necesidad de técnicas avanzadas de manejo del agua, como el riego por goteo, para optimizar el uso de este recurso limitado en períodos críticos.

Según Srivastava y cols. (2021), se requiere una gestión integrada del agua para mitigar estos conflictos. Las estrategias como la captación de agua de lluvia, el uso de tecnologías de riego eficientes y la implementación de sistemas de almacenamiento pueden ayudar a equilibrar las necesidades de ambos sectores. Además, las prácticas agrícolas sostenibles, como la cobertura del suelo y el uso de cultivos resistentes al estrés hídrico, pueden reducir la dependencia de recursos hídricos adicionales, mejorando la sostenibilidad general de las actividades agropecuarias en Pastaza.

La dinámica de evaporación en Pastaza muestra una relación con la radiación solar y la cobertura vegetal, factores que modulan la disponibilidad hídrica efectiva en el suelo. Según Arias-Muñoz y cols. (2025), la variación térmica y la intensidad de la radiación inciden directamente sobre el balance de agua en ecosistemas amazónicos, determinando la velocidad de evaporación y la retención de humedad superficial. En combinación con lo expuesto

por Misra y cols. (2020), el aumento de la evaporación reduce la capacidad de los cultivos para mantener la humedad radicular necesaria, afectando los procesos fisiológicos como la transpiración y la asimilación de nutrientes.

3.6 Modelos de regresión de las variables climáticas

Las regresiones aplicadas a las variables climáticas muestran comportamientos polinómicos de sexto orden que describen de manera adecuada la variación mensual de las condiciones meteorológicas registradas en el cantón Pastaza durante el período 2011-2021 (Tabla 3). Los resultados evidencian que las variables presentan una tendencia no lineal, determinada principalmente por los ciclos estacionales y los factores atmosféricos propios de las zonas tropicales.

Según Srivastava y cols. (2021), se requiere una gestión integrada del agua para mitigar estos conflictos. Las estrategias como la captación de agua de lluvia, el uso de tecnologías de riego eficientes y la implementación de sistemas de almacenamiento pueden ayudar a equilibrar las necesidades de ambos sectores. Además, las prácticas agrícolas sostenibles, como la cobertura del suelo y el uso de cultivos resistentes al estrés hídrico, pueden reducir la dependencia de recursos hídricos adicionales, mejorando la sostenibilidad general de las actividades agropecuarias en Pastaza.

La dinámica de evaporación en Pastaza muestra una relación con la radiación solar y la cobertura vegetal, factores que modulan la disponibilidad hídrica efectiva en el suelo. Según Arias-Muñoz y cols. (2025), la variación térmica y la intensidad de la radiación inciden directamente sobre el balance de agua en ecosistemas amazónicos, determinando la velocidad de evaporación y la retención de humedad superficial. En combinación con lo expuesto por Misra y cols. (2020), el aumento de la evaporación reduce la capacidad de los cultivos para mantener la humedad radicular necesaria, afectando los procesos fisiológicos como la transpiración y la asimilación de nutrientes.

3.7 Modelos de regresión de las variables climáticas

Las regresiones aplicadas a las variables climáticas muestran comportamientos polinómicos de sexto orden que describen de manera adecuada la variación mensual de las condiciones meteorológicas registradas en el cantón Pastaza durante el período 2011-2021 (Tabla 3). Los resultados evidencian que las variables presentan una tendencia no lineal, determinada principalmente por los ciclos estacionales y los factores atmosféricos propios de las zonas tropicales.

Tabla 3. Modelos de regresión polinómica de las variables climáticas en Pastaza (2011–2021).

Variable climática	Ecuación de regresión polinómica (6° orden)	R ²	Figura
Temperatura media mensual (°C)	$y = 0,0001x^6 - 0,0061x^5 + 0,0989x^4 - 0,758x^3 + 2,7766x^2 - 4,418x + 23,662$	0,9203	Fig. 2
Precipitación total mensual (mm)	$y = -0,0045x^6 + 0,0077x^5 + 2,7198x^4 - 41,931x^3 + 228,04x^2 - 465,95x + 697,76$	0,8897	Fig. 3
Humedad relativa media mensual (%)	$y = -0,0008x^6 + 0,0278x^5 - 0,3888x^4 + 2,5911x^3 - 8,5432x^2 + 12,864x + 82,524$	0,9358	Fig. 4
Evaporación potencial media mensual (mm)	$y = 0,0074x^6 - 0,2911x^5 + 4,4075x^4 - 32,189x^3 + 116,84x^2 - 191,76x + 165,64$	0,9795	Fig. 5

De manera general, las tendencias identificadas confirman que las fluctuaciones climáticas en Pastaza no responden a relaciones lineales simples, sino a comportamientos polinómicos que representan mejor la dinámica atmosférica local. Estos resultados coinciden con lo señalado por Shah y cols. (2019), quienes explican que la radiación solar y la presión atmosférica generan variaciones complejas en regiones tropicales que dificultan el uso de modelos lineales. En este contexto, se recomienda complementar el análisis con enfoques estocásticos o de aprendizaje automático para capturar patrones no deterministas en la variabilidad climática (Gowtham y cols., 2018; Pujahari y cols., 2022).

3.8 Impacto mensual de factores climáticos sobre los cultivos

Durante enero y octubre, la saturación del suelo por alta humedad y lluvias intensas afecta los cultivos como caña de azúcar y plátano, lo que coincide con lo reportado por Arias-Muñoz y cols. (2025),

quienes proyectan una reducción del 14,65% en la superficie de cultivo de caña hacia 2031, como consecuencia de la presión ambiental y climática. En abril, la alta humedad y temperatura favorecen la proliferación de hongos y bacterias en frutos tropicales, como el cacao, situación que se intensificará bajo los escenarios RCP (Trayectorias Representativas de Concentración, por sus siglas en inglés) 4.5 y 8.5 por el incremento de precipitaciones extremas y temperatura (Serrano-Vincenti y cols., 2025).

A partir de junio se observa un déficit hídrico inicial y progresivo, el cual afecta a los cultivos como el plátano, la caña de azúcar y la yuca. Este patrón se alinea con Cachipuendo y cols. (2025), quienes advierten sobre la vulnerabilidad de los sistemas agrícolas frente a la reducción de la disponibilidad hídrica debido a la pérdida de capacidad de retención. Además, septiembre presenta un riesgo de floración asincrónica por precipitaciones irregulares, afectando la sincronización fenológica del cacao.

Finalmente, diciembre muestra una mayor incidencia de plagas, en línea con Meza y cols. (2020), donde el calentamiento climático intensifica la reproducción de patógenos y plagas en los sistemas agrícolas tradicionales. Estos efectos validan la ne-

cesidad de estrategias locales de adaptación climática, especialmente en zonas de producción diversificada y limitada infraestructura de riego.

Tabla 4. Relación entre condiciones climáticas mensuales, tipo de afectación y cultivos sensibles.

Mes	Factor climático	Tipo de afectación	Cultivos potencialmente afectados
Enero	Alta humedad + lluvias intensas	Saturación del suelo	Caña de azúcar, yuca, plátano
Febrero	Alta humedad + baja radiación	Reducción de la fotosíntesis	Cacao
Marzo	Exceso de lluvias	Encharcamiento, erosión	Naranja
Abril	Alta humedad + temperaturas altas	Proliferación de enfermedades	Cacao
Mayo	Lluvias moderadas	Buen desarrollo vegetativo	Maíz, yuca
Junio	Menor humedad relativa	Déficit hídrico inicial	Plátano, caña de azúcar, yuca
Julio	Baja precipitación	Estrés hídrico progresivo	Pastos
Agosto	Déficit de humedad + alta radiación	Marchitez, reducción del rendimiento	Yuca, plátano
Septiembre	Precipitaciones irregulares	Riesgo de floración asincrónica	Cacao
Octubre	Incremento de lluvias	Saturación del suelo	Caña, yuca
Noviembre	Alta humedad y nubosidad	Reducción de maduración	Cacao
Diciembre	Lluvias intensas y calor	Aumento de plagas y hongos	Plátano

4 Conclusiones

La temperatura media mensual se mantuvo entre 20,63 °C y 22,06 °C, un rango favorable para los cultivos como el plátano y la yuca, aunque inferior al óptimo para el cacao, lo que limita su productividad. La precipitación total mensual alcanzó valores máximos en abril y mayo (450–470 mm), favoreciendo el desarrollo de la caña de azúcar, pero incrementando el riesgo de encharcamiento en cultivos sensibles como el café. La disminución de lluvias en septiembre y octubre redujo la disponibilidad hídrica, afectando la producción forrajera y la sostenibilidad de los sistemas ganaderos.

Los niveles elevados de humedad relativa (85%–89%) incrementaron la incidencia de enfermedades fúngicas en el cacao y el café, generando mayores costos de manejo, mientras que en la ganadería se observó un aumento de enfermedades respiratorias. Finalmente, la evaporación potencial, que alcanzó su máximo en septiembre (89,57 mm), evidenció la necesidad de estrategias de manejo del agua y prácticas de conservación de humedad en el suelo para evitar el estrés hídrico.

Contribución de los autores

B.T.L.Z.: Conceptualización, Análisis formal, Curación de datos. **J.M.M.V.:** Redacción – borrador original, Metodología e Investigación. **R.D.V.P.:** Redacción – revisión y edición, Validación.

Referencias

- Aguilera-Arango, G. A., Puentes-Díaz, C. L., y Morillo-Coronado, Y. (2022). Importancia de los recursos genéticos de la piña (*Ananas comosus* [L.] Merr. var. *comosus*) en Colombia. *Agronomía Mesoamericana*, 33(2), 48171. Online: <https://doi.org/10.15517/am.v33i2.48171>
- Alvarado Irías, E. E., y Colon García, A. P. (2023). Determinantes de la adaptación en el marco de un análisis de riesgo y vulnerabilidad al cambio climático. *Revista Universidad y Sociedad*, 15(2), 141–151. Online: <https://h7.cl/1of1b>
- 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*, 42(2), 90–105. Online: <https://doi.org/10.17163/lgr.n42.2025.06>
- Arteaga, L. E., y Burbano, J. E. (2018). Effects of climate change: A look to Agriculture. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 35(2), 79–91. Online: <https://doi.org/10.22267/rcia.183502.93>
- Bibi, F., y Rahman, A. (2023). An overview of climate change impacts on agriculture and their mitigation strategies. *Agriculture*, 13(8), 1508. Online: <https://doi.org/10.3390/agriculture13081508>
- Bilali, H., Bassole, I. H. N., Dambo, L., y Berjan, S. (2020). Climate change and food security. *Agriculture and Forestry*, 66(3), 197–210. Online: <https://doi.org/10.17707/AgriForest.66.3.16>
- Bonet-Pérez, C., Guerrero-Posada, P., Hernández-Llanes, J., Rodríguez-Correa, D., y La Rosa-Fernández, Y. (2021). Riego y drenaje en el cultivo de la piña (cultivar MD-2) en Ciego de Ávila. *Revista Ingeniería Agrícola*, 11(1), e02. Online: <https://h7.cl/1of1f>
- Brenes Gamboa, S. (2018). Evaluación del rendimiento y periodo de descanso de tres pastos de piso. *InterSedes*, 19(39), 133–145. Online: <https://doi.org/10.15517/isucr.v19i39.34073>
- Cachipuendo, 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*, 42(2). Online: <https://doi.org/10.17163/lgr.n42.2025.03>
- Cargua, C. J., Espin, R., Valencia, B. G., Simbaña, M., Araujo, S., Cornejo, C., y Ocampos, A. (2024). Análisis de susceptibilidad a deslizamientos empleando el proceso de jerarquía analítica en una carretera Amazónica del Ecuador. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*, 39(1), 116–136. Online: <https://doi.org/10.17163/lgr.n39.2024.07>
- Castillo, M., Brambila-Paz, J., García-Sánchez, R., Omaña-Silvestre, J., Gonzalez-Estrada, A., y Legarreta-Gonzalez, M. (2024). Factores socioeconómicos que afectan el rendimiento del cacao, en el norte centro, Nicaragua. *Estudios Sociales. Revista de Alimentación Contemporánea y Desarrollo Regional*, 34(63), e241385. Online: <https://doi.org/10.24836/es.v34i63.1385>
- Cedeño García, G., Velásquez Cedeño, S., Cedeño, B., Chávez, J., y Álava, G. (2021). Bioestimulante en el crecimiento y calidad de plántulas de plátano en fase de vivero. *Revista Espamciencia*, 12(2), 124–130. Online: https://doi.org/10.51260/revista_espamciencia.v12i2.274
- Coelho, E., Ferreira Lima, L., Stringam, B., Matos, A., Lima Santos, D., Reinhardt, D., ... Cunha, F. (2024). Water productivity in pineapple (*Ananas comosus*) cultivation using plastic film to reduce evaporation and percolation. *Agricultural Water Management*, 296(1), 108785. Online: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108785>
- Conejo-Morales, J. F., y Wing Ching, R. (2020). Condiciones climáticas y la producción láctea del ganado jersey en dos pisos altitudinales. *Agronomía Mesoamericana*, 31(1), 157–176. Online: <https://doi.org/10.15517/am.v31i1.34739>
- Cvetkovic-Vega, A., Maguiña Jorge, L., Soto Alonso, L.-V. J., y López Lucy, E. C. (2021). Estudios transversales. *Revista de la Facultad de Medicina Humana*, 21(1), 179–185. Online: <https://doi.org/10.25176/rfmh.v21i1.3069>
- Cárdenas, E., y Telles, F. (2023). Características agronómicas y productivas de tres variedades de alfalfa (*Medicago sativa* L.) en la sierra central del Perú. *Anales Científicos*, 84(1), 110–116. Online: <https://doi.org/10.21704/ac.v84i2.2000>
- Duran, M., Ramos, F. L., Alvarado, R., y Altamirano, L. (2021). Evaluación del índice de estrés hídrico de cultivos (IEHC) en ají (*Capsicum*) bajo riego por goteo en las condiciones áridas de la costa norte del Perú. *Scientia Agropecuaria*, 12(4), 481–489. Online: <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2021.052>
- Díaz Serna, J. C. (2024). Relación espacial entre propiedades de suelos y estrés hídrico en caña de azúcar en la hacienda Churimal-Roldanillo-Valle del Cauca, Colombia. *Suelos Ecuatoriales*, 49(1 y 2), 65–74. Online: [https://doi.org/10.47864/SE\(49\)2019p65-74_107](https://doi.org/10.47864/SE(49)2019p65-74_107)
- Espinel Rubio, G. A., y Feo-Ardila, D. (2022). Territorio e identidad de resistencia en jóvenes del Catatumbo (Colombia), constructores de paces im-

- perfectas. *Investigación & Desarrollo*, 30(1), 40–68. Online: <https://doi.org/10.14482/INDES.30.1.303.661>
- Ferrer-Sánchez, Y., Mafaldo-Sajami, A., Plasencia-Vázquez, A., y Urdánigo, J. (2022). Riesgo para el cultivo de cacao por los cambios en la distribución potencial del fitopatógeno *Monilophthora perniciosa* bajo escenarios de cambio climático en Ecuador continental. *Revista Terra*, 40(1), 1–10. Online: <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.1338>
- Garay-Peralta, I., Villarruel-Fuentes, M., Peón, A., Chávez-Morales, R., y Herrera-Alarcón, J. (2024). Factores climáticos en el desarrollo y producción de cacao en Úrsulo Galván, Veracruz, México. *Agronomía Mesoamericana*, 35(1), 54337. Online: <https://doi.org/10.15517/am.2024.54337>
- García-Rengifo, C., y Durán-Ballén, S. (2023). Variabilidad climática en la cuenca hidrográfica del río Chalpi Grande en Napo-Ecuador. *Enfoque UTE*, 14(1), 1–17. Online: <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.872>
- Gobierno Provincial de Pastaza. (2020). *Información de la Provincia de Pastaza*. Recuperado el 26 diciembre 2024 de <https://h7.cl/1jcDc>.
- González Osorio, B. B., Barragán Monrroy, R., Simba Ochoa, L., y Rivero Herrada, M. (2020). Influencia de las variables climáticas en el rendimiento de cultivos transitorios en la provincia Los Ríos, Ecuador. *Centro Agrícola*, 47(4), 54–64. Online: <https://h7.cl/1of1n>
- Gowtham, R., Ramaraj, A. P., y Geethalakshmi, V. (2018). Chapter 13 - Climate Change Projections and Addressing Intrinsic Uncertainties. En C. Sivaperuman, A. Velmurugan, A. K. Singh, y I. Jaisankar (Eds.), *Biodiversity and climate change adaptation in tropical islands* (pp. 387–402). Academic Press. Online: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813064-3.00013-2>
- Hernández, C., Methol, M., y Cortelezzi, (2018). Estimación de pérdidas y daños por eventos climáticos extremos en el sector agropecuario. *Anuario OPYPA*, 1, 559–568. Online: <https://h7.cl/1of1u>
- Hidalgo, D., Domínguez, C., Villacís, M., Ruíz, J.-C., Maisincho, L., Cáceres, B., ... Piedra, D. (2024). Retroceso del glaciar del Carihuairazo y sus implicaciones en la comunidad de Cunucyacu. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*, 39(1), 92–115. Online: <https://doi.org/10.17163/lgr.n39.2024.06>
- Kumar, L., Chhogyel, N., Gopalakrishnan, T., Hasan, M. K., Jayasinghe, S. L., Kariyawasam, C. S., ... Ratnayake, S. (2022). Chapter 4 - Climate change and future of agri-food production. En R. Bhat (Ed.), *Future foods* (pp. 49–79). Academic Press. Online: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91001-9.00009-8>
- Lal, R. (2021). Chapter 31 - Climate change and agriculture. En T. M. Letcher (Ed.), *Climate change* (Third ed., pp. 661–686). Elsevier. Online: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821575-3.00031-1>
- Lopez, M., Badillo, M., Bautista, A., y Rico, A. (2021). Hongos en semillas de *Pinus montezumae* Lamb. y *Pinus greggii* Engelm. ex Parl. almacenadas bajo dos humedades relativas. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 12(66), 1–16. Online: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i66.689>
- Mamani-Huayhua, G., Leon-Ttacca, B., Palao-Iturregui, L. A., y Borja-Loza, Y. R. (2021). Biocontrol de la roya amarilla del cafeto (*Hemileia vastatrix* Berk. & Br.) con cepas de *Trichoderma* sp. endófito. *Cultivos Tropicales*, 42(4), e01. Online: <https://h7.cl/1of1y>
- Mestanza Uquillas, C. A., Cedeño Cárcamo, P. J., Véliz Zamora, D. V., Vásquez Matute, S. C., y Pinargote Alava, J. J. (2025). Distanciamiento de siembra en *Zea mays* L. durante la época seca y lluviosa en la costa central del Ecuador. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*, 41(1), 151–161. Online: <https://doi.org/10.17163/lgr.n41.2025.10>
- Meza, K., Cusme, M., Velasquez, J., y Chirinos, D. (2020). Trips (Thysanoptera) asociados con la pitahaya *Selenicereus undatus* (Haw.) D.R. Hunt. Especies, niveles poblacionales, daños y algunos enemigos naturales. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*, 32(2). Online: <https://doi.org/10.17163/lgr.n32.2020.07>
- Midence, M., y Blas, R. (2024). Enfermedad renal crónica asociada al estrés térmico: una revisión de literatura. *Revista Torreón Universitario*, 13(1), 211–223. Online: <https://doi.org/10.5377/rtu.v13i38.19310>

- Misra, V., Solomon, S., Mall, A. K., Prajapati, C. P., Hashem, A., Abd_Allah, E. F., y Ansari, M. I. (2020). Morphological assessment of water stressed sugarcane: A comparison of waterlogged and drought affected crop. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 27(5), 1228–1236. Online: <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.02.007>
- Monsanto, L., Mota, N., y Gómez, X. (2020). La producción de semillas y raíces del cultivo de yuca se mantiene bajo diferentes densidades de siembra: un enfoque agroecológico. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 23(3), 1–7. Online: <https://doi.org/10.56369/tsaes.3388>
- Monterroso-Rivas, A. I., y Gómez-Díaz, J. D. (2021). Impacto del cambio climático en la evapotranspiración potencial y periodo de crecimiento en México. *Terra Latinoamericana*, 39(1), e774. Online: <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.774>
- Mosquera Ponce, J. D. C., Alvarado Santacruz, F. J., Yumbo Licuy, A. M., y Muñoz Pinela, A. G. (2024). Análisis del sistema de producción agropecuaria y su contribución a la economía familiar en la provincia de Pastaza. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 8(3), 6838–6863. Online: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i3.11880
- Ordoñez, L., Vallejo, E., Amariles, D., Mesa, J., Esquivel, A., Llanos-Herrera, L., ... Ramirez-Villegas, J. (2022). Applying agroclimatic seasonal forecasts to improve rainfed maize agronomic management in Colombia. *Climate Services*, 28(1), 100333. Online: <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2022.100333>
- Paliz, C., Perugachi, N., Martínez, J., Moreno, M., Yaucán, C., y Palaguachi, R. (2021). Análisis estadístico de datos de las precipitaciones usando métodos robustos y bootstrap. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, 12(2), 52–61. Online: <https://doi.org/10.29166/revfig.v12i2.3515>
- Parada-Molina, P. C., Cervantes-Pérez, J., Ruiz-Molina, V. E., y Cerdán Cabrera, C. R. (2020). Efectos de la variabilidad de la precipitación en la fenología del café: caso zona cafetalera Xalapa-Coatepec, Veracruz, Mex. *Revista Ingeniería y Región*, 24(1), 61–71. Online: <https://doi.org/10.25054/22161325.2752>
- Pozo-Santiago, C. O., Velázquez-Martínez, J. R., Torres-De la Cruz, M., Cruz-Pérez, A. D. I., Capello-García, S., y Sánchez-Gutierrez, F. (2020). El papel de la humedad relativa, temperatura y sustratos en la supervivencia de *Nasutitermes corniger*. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 7(3), e2742. Online: <https://doi.org/10.19136/era.a7n3.2742>
- Pujahari, R. M., Yadav, S. P., y Khan, R. (2022). Chapter 6 - Intelligent farming system through weather forecast support and crop production. En M. A. Khan, R. Khan, y M. A. Ansari (Eds.), *Application of machine learning in agriculture* (pp. 113–130). Academic Press. Online: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90550-3.00009-6>
- Quiroz Antunez, U. G., Monterroso Rivas, A. I., Calderón Vega, M. F., y Ramírez García, A. G. (2022). Aptitud de los cultivos de café (*Coffea arabica* L.) y cacao (*Theobroma cacao* L.) considerando escenarios de cambio climático. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*, 36(2), 60–74. Online: <https://doi.org/10.17163/lgr.n36.2022.05>
- Quiroz Guerrero, I., Pérez-Vázquez, A., Landeros Sánchez, C., Gallardo López, F., Velasco Velasco, J., y Benítez Badillo, G. (2024). Capacidad de resiliencia del agroecosistema café en Tezonapa, Veracruz, México. *Agronomía Mesoamericana*, 35(1), 55146. Online: <https://doi.org/10.15517/am.2024.55146>
- Rosero, A., Montes, A., Mara, S., Herazo, J., Valencia, K., Andrade, L. A., ... Trujillo, M. (2024). *Modelo productivo de las variedades registradas de yuca industrial para el Caribe colombiano* (Vol. 1). Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). Online: <https://doi.org/10.21930/agrosavia.model.7407235>
- Rosvold, E. L. (2021). Chapter 19 - Security implications of climate change: The climate-conflict nexus. En T. M. Letcher (Ed.), *The impacts of climate change* (pp. 465–478). Elsevier. Online: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822373-4.00015-X>
- Santiago-Elena, E., Zamora-Macorra, E. J., Zamora-Macorra, M., y Elizalde-Gaytan, K. G. (2020). Interacción entre *Mycodiplosis* y *Hemileia vastatrix* en tres escenarios de manejo del cultivo de café (*Coffea arabica*). *Revista Mexicana de Fitopatología*, 38(3), 320–336. Online: <https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.2005-2>

- Santiago Zárate, I. M., Martínez Damián, M., Cuevas Alvarado, C. M., Valdivia Alcalá, R., García Hernández, M. I., y Hernández Toscano, J. (2021). Productividad y cambio tecnológico en la agroindustria de la caña de azúcar en México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 12(6), 1005–1017. Online: <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i6.2692>
- Serrano-Vincenti, S., Guamán-Pozo, J., Chuqui, J., Tufiño, R., y Franco-Crespo, C. (2025). Measuring the effects of climate change on traditional crops in tropical highlands, Ecuador. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 9. Online: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1447593>
- Sgroi, F. (2023). Circular economy and sustainable agri-food systems. *Journal of Agriculture and Food Research*, 14, 100815. Online: <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100815>
- Shah, K., Chaturvedi, V., y Gupta, S. (2019). Chapter 25 - Climate Change and Abiotic Stress-Induced Oxidative Burst in Rice. En M. Hasanuzzaman, M. Fujita, K. Nahar, y J. K. Biswas (Eds.), *Advances in rice research for abiotic stress tolerance* (pp. 505–535). Woodhead Publishing. Online: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814332-2.00025-3>
- Singh, N. K., Yadav, M., Singh, V., Padhiyar, H., Kumar, V., Bhatia, S. K., y Show, P.-L. (2023). Artificial intelligence and machine learning-based monitoring and design of biological wastewater treatment systems. *Bioresource Technology*, 369(1), 128486. Online: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128486>
- Sistema de Información Pública Agropecuaria. (2024). *Información productiva territorial*. Recuperado de <https://h7.cl/1jcDz>.
- Srivastava, P. K., Suman, S., Pandey, V., Gupta, M., Gupta, A., Gupta, D. K., ... Singh, U. (2021). Chapter 1 - Concepts and methodologies for agricultural water management. En P. K. Srivastava, M. Gupta, G. Tsakiris, y N. W. Quinn (Eds.), *Agricultural water management* (pp. 1–18). Academic Press. Online: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812362-1.00001-1>
- Valle, S. B., Yaguache, B. D., Caicedo, W. O., Toscano, J. F., Yucailla, D. M., y Abril, R. V. (2021). Caracterización socioeconómica y productiva de los cañicultores de la provincia Pastaza, Ecuador. *Cuban Journal of Agricultural Science*, 55(2), 113–127. Online: <https://h7.cl/1of1P>
- Viera González, E. Y., Barcia Sardiñas, S., y Gómez Díaz, D. (2023). Servicios climáticos para el sector agrícola, basados en los pilares del Marco Mundial para los Servicios Climáticos. *Revista Cubana de Meteorología*, 29(2), 1–14. Online: <https://h7.cl/1of1U>
- Vásquez, S. C., Villavicencio Sanchez, E. I., Guamán, A. O., Molina-Müller, M., y Mestanza Uquillas, C. A. (2024). Efecto de la densidad de plantas sobre los componentes del rendimiento de fréjol cultivado en condiciones de campo en un valle interandino de Ecuador. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*, 39(1), 160–170. Online: <https://doi.org/10.17163/lgr.n39.2024.10>
- Vásquez-Dávila, S., y Bravo-Benavides, D. (2023). Impacto del cambio climático en la producción agrícola de la provincia de Loja, periodo 2007-2020. *Revista Económica*, 11(1), 93–103. Online: <https://doi.org/10.54753/rve.v11i1.1623>
- Vélez-Izquierdo, A., Espinosa-García, J. A., Uresti-Gil, J., Jolalpa-Barrera, J. L., Rangel-Quintos, J., y Uresti-Duran, D. (2020). Estudio técnico-económico para identificar áreas con potencial para producir piña en el trópico húmedo de México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 11(7), 1619–1632. Online: <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i7.2594>
- World Meteorological Organization. (2010). *Manual on the global observing system: Volume II – Regional Aspects*. World Meteorological Organization (WMO). Online: <https://h7.cl/1of20>
- World Meteorological Organization. (2021). *WMO Atlas of Mortality and Economic Losses from Weather, Climate and Water Extremes (1970–2019)*. World Meteorological Organization (WMO). Online: <https://h7.cl/1jcDS>
- Zambrano, J., Párraga, J., Cobeña, C., Jiménez-Flores, L., Ulloa, S., López, F., ... Urdaneta, A. (2021). Fertilización con magnesio en plátano 'Barraganete' (*Musa AAB*) Ecuador. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*, 35(1), 8–19. Online: <https://doi.org/10.17163/lgr.n35.2022.01>



ANÁLISIS CUANTITATIVO DE LA RIQUEZA DE CULTIVOS Y LA ADOPCIÓN DE MONOCULTIVOS EN EL ECUADOR

QUANTITATIVE ANALYSIS OF CROP RICHNESS AND MONOCULTURE ADOPTION IN ECUADOR

Cristian Vasco ^{*1} y Lourdes Caisaguano ²

¹Waylla Sacha S.A.S., Ecuador.

²Universidad Central del Ecuador, Facultad de Ciencias Agrícolas, Ecuador. [<https://ror.org/010n0x685>]

*Autor para correspondencia: leovas23@gmail.com

Manuscrito recibido el 19 de diciembre de 2021. Aceptado, tras revisión el 22 de junio de 2022. Publicado el 1 de marzo de 2026.

Resumen

Los sistemas tradicionales de producción en países tropicales han demostrado ser relativamente productivos, al tiempo que tienen un menor impacto ambiental en comparación con la agricultura convencional. Sin embargo, la penetración de la economía de mercado y la irrupción de la agricultura comercial se reportan como factores que tienen un efecto negativo en la agrobiodiversidad de los sistemas tradicionales. Este artículo analiza los determinantes socioeconómicos de la riqueza de cultivos y adopción del monocultivo entre los agricultores ecuatorianos. Los datos corresponden a la Encuesta de Condiciones de Vida-2014, y se usaron técnicas multivariadas para evaluar los factores que influyen en las decisiones de cuántos cultivos producir y la probabilidad de adopción del monocultivo. Los resultados muestran que el número de cultivos que produce un hogar es mayor para los hogares pobres y numerosos que son liderados por indígenas. Por otra parte, la riqueza de cultivos es menor para los hogares con mayor educación, que tienen empleo fuera de la finca y residen cerca de una carretera. En términos de qué tipo de hogar tiene mayores probabilidades de incursionar en el monocultivo, este es un hogar que tiene empleo fuera de finca, usa pesticidas y se localiza cerca de una carretera. También, los hogares pobres con jefes indígenas tienen menores probabilidades de adoptar el monocultivo. Estos resultados demuestran la importancia que tienen los agrosistemas diversos para los habitantes de áreas rurales en Ecuador, y reflejan que los legisladores deberían enfocarse en la promoción y el rescate de los agrosistemas tradicionales como una estrategia para alcanzar la seguridad alimentaria y promover la agricultura sostenible.

Palabras clave: Riqueza de cultivos, monocultivo, determinantes socioeconómicos, análisis multivariado, Ecuador

Abstract

In tropical countries, traditional production systems have proved to be fairly productive whereas having a lower environmental impact than conventional agriculture. Nevertheless, factors such as the penetration of the market economy and the disruption of commercial agriculture are reported to have negative effects on agrobiodiversity of traditional systems. This paper analyzes the socioeconomic determinants of crop richness and monocropping among Ecuadorian farmers. Using data from the Living Standards Measurement Survey-2014, multivariate techniques were used to assess the factors influencing decisions on how many crops to grow and on the likelihood of adopting monocropping. The results show that the number of crops a household grows is larger for poor large indigenous households. In contrast, crop richness is smaller for more educated households receiving off-farm income and residing near a road. In terms of which kind of household is the most likely to engage in monocropping, this is a household that has off-farm work, uses pesticides, and is located next to a road. On the other hand, poor indigenous households have less odds to adopt monoculture. These results demonstrate the importance of diversified agrosystems for rural people in Ecuador and reflect that policy makers should focus on the rescue and promotion of traditional agrosystems as a way to reach food security while promoting sustainable agriculture.

Keywords: Crop richness, monoculture, socioeconomic determinants, multivariate analysis, Ecuador

Forma sugerida de citar: Vasco, C. y Caisaguano, L. (2026). Análisis cuantitativo de la riqueza de cultivos y la adopción de monocultivos en el Ecuador. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*. Vol. 43(1):117-131. <https://doi.org/10.17163/lgr.n43.2026.06>.

Orcid IDs:

Cristian Leopoldo Vasco Pérez: <https://orcid.org/0000-0001-7414-4910>

Lourdes Janeth Caisaguano Licta: <https://orcid.org/0000-0001-5496-8197>

1 Introducción

La expansión de la agricultura convencional tiene impactos ambientales negativos (Ongley y cols., 2010; Comoretto y cols., 2008; Lambin y cols., 2001). Por lo tanto, muchos reclaman que existan sistemas de producción más sostenibles (Holt-Giménez y Altieri, 2013). En muchos países tropicales se necesitan los sistemas de producción tradicionales para mantener la seguridad alimentaria y los medios de vida de la población rural, ya que han demostrado ser productivos y, al mismo tiempo, más respetuosos con el medio ambiente (Coq-Huelva y cols., 2018; Torres y cols., 2015). Una de las características clave de los sistemas diversificados es su alto nivel de diversidad vegetal en forma de policultivos y sistemas agroforestales. Pero, el mantenimiento de la biodiversidad de los cultivos es una estrategia utilizada deliberadamente por los agricultores para reducir los riesgos, estabilizar el rendimiento de los cultivos, promover la diversidad de la dieta y maximizar los rendimientos, incluso con un acceso limitado a las tecnologías y recursos modernos (Altieri, 2009, 2002). La diversidad de cultivos y árboles en los agroecosistemas tradicionales promueve el reciclaje de nutrientes, mejora el uso del agua, los nutrientes y la luz solar, reduce la incidencia de plagas y malas hierbas, y permite a los agricultores producir en una variedad de agroecosistemas con diferentes suelos y condiciones agroclimáticas (Holt-Giménez y Altieri, 2013; Abebe, 2013; Altieri y cols., 2012).

Si bien los sistemas tradicionales han demostrado ser resilientes y han resistido el paso del tiempo (Altieri y cols., 2012), existe una serie de factores, entre ellos la penetración del mercado, la migración, el crecimiento demográfico, la fragmentación de la tierra, los cambios políticos y la modernización agrícola, que pueden tener un efecto negativo en la diversidad de los cultivos. Existen pocos estudios de caso centrados en analizar los factores socioeconómicos que afectan a la diversidad de los cultivos en los países tropicales. Por ejemplo, en Etiopía, Abebe (2013) descubrió que la proximidad a los mercados ejerce un efecto negativo en la diversidad de los cultivos, ya que los agricultores que residen cerca de los mercados prefieren especializarse en la producción de cultivos comerciales que pueden comercializarse fácilmente y comprar en el mercado otros productos que necesitan para el

consumo doméstico. En la Amazonía ecuatoriana, Torres y cols. (2018) descubrieron que los hogares que obtienen sus medios de vida principalmente de la producción ganadera y del empleo no agrícola cultivan menos que aquellos para los que la agricultura es su principal actividad de subsistencia. Además, los autores informaron que los hogares con fácil acceso a carreteras tienden a presentar bajos niveles de diversificación de cultivos.

En Malawi, Fatch y cols. (2020) determinaron que los hogares que reciben ingresos no agrícolas están menos diversificados que los que obtienen sus ingresos únicamente de actividades agrícolas. Los autores sostienen que esto se debe a que los hogares que se dedican a trabajos no agrícolas carecen de la mano de obra necesaria para mantener una explotación agrícola diversificada. En su estudio en Indonesia, Abdoellah y cols. (2006) informaron que la diversificación de cultivos ha disminuido, ya que muchos hogares se dedican al monocultivo, pasando de la agricultura de subsistencia a la comercial. Otras investigaciones también revelan que los pueblos indígenas tienden a mantener huertos domésticos muy diversificados (Perrault-Archambault y Coomes, 2008; Torres y cols., 2018; Abril Saltos y cols., 2016) y a utilizar prácticas agrícolas con un bajo impacto medioambiental; sin embargo, los datos recientes (Vasco, Torres, y cols., 2021) reflejan que los pueblos indígenas también se dedican a prácticas agrícolas insostenibles (es decir, tala de bosques, monocultivo, ganadería, uso de productos químicos) cuando entran en contacto con la economía de mercado.

Por medio del uso de datos de la Encuesta de Medición de Niveles de Vida 2013-2014, este artículo se suma a la bibliografía existente al examinar los determinantes socioeconómicos de la diversidad de cultivos —aproximada por el número de cultivos que ha producido un hogar— y la probabilidad de adopción del monocultivo en las zonas rurales de Ecuador. En cuanto al resto del documento, está estructurado de la siguiente manera: la sección 2 describe Ecuador en términos de sus regiones geográficas y sus patrones agrícolas, la sección 3 describe la encuesta y explica los métodos estadísticos, la sección 4 presenta y analiza los resultados, mientras que la sección 5 concluye.

2 El contexto: la agricultura en Ecuador

El sector agrícola es importante para la economía ecuatoriana, pues representa el 8% del PIB del país y alrededor del 42% de las exportaciones no petroleras, siendo los plátanos, el cacao, el café, las flores frescas y las frutas los principales productos exportables (BCE, 2019). La agricultura es la principal actividad económica de alrededor del 48% de la población rural, y los ingresos procedentes de la agricultura representan, en promedio, alrededor del 40% de los ingresos de los hogares rurales (Vasco y Tamayo, 2017; INEC, 2010). A pesar de estas cifras, también se ha informado de que la agricultura convencional tiene efectos negativos sobre el medio ambiente, como el avance de la frontera agrícola y la contaminación difusa (Wunder, 2001). La concentración de la tierra es un problema, con un coeficiente de Gini de 0,8 y un 63,5% de las explotaciones agrícolas con menos de 5 hectáreas (Brassel y cols., 2010). Muchas de esas explotaciones presentan un alto grado de diversidad biológica en forma de policultivos y sistemas agroforestales y, aunque son pequeñas, sustentan a familias campesinas y proporcionan el 64% de la producción agrícola del país (FAO, 2021).

El Ecuador continental se subdivide en tres regiones geográficas: la región costera (la *Costa*), la región montañosa (la *Sierra*) y la *Amazonía*. Las marcadas diferencias en términos de paisaje, ecosistemas y antecedentes socioculturales determinan los patrones agrícolas específicos de cada región (Intriago y cols., 2017). A modo de ejemplo, la región costera abarca todas las llanuras a lo largo del océano Pacífico y las estribaciones de los Andes, y se caracteriza por una vegetación exuberante que combina bosques secos y, en menor medida, bosques siempreverdes, aunque una parte importante de la vegetación autóctona ha desaparecido en favor de los usos agrícolas (MAE, 2013).

Esta región concentra la agricultura orientada a la exportación, con grandes plantaciones de banana, cacao y palma aceitera que representan alrededor del 67% de la superficie plantada con cultivos perennes. Esta región también cuenta con importantes áreas dedicadas a pastos y cultivos temporales, como el arroz, el maíz y la soja (INEC, 2021). A pesar de la expansión del monocultivo para produ-

cir productos agrícolas básicos, muchos pequeños agricultores siguen practicando la agricultura tradicional y mantienen explotaciones con altos niveles de biodiversidad, principalmente para el autoconsumo (Intriago y cols., 2017).

La *Sierra* comprende los territorios andinos. La región es muy heterogénea en cuanto a altitud, topografía, temperatura y suelos (Hofstede y cols., 1998). La agricultura se centra principalmente en la producción de alimentos básicos, como papas, maíz, frijoles y tubérculos, entre otros, aunque hay zonas importantes, generalmente las llanuras y las tierras más fértiles, dedicadas a la producción de flores frescas y brócoli para la exportación (INEC, 2021). Los ingresos agrícolas son la principal fuente de ingresos de los hogares rurales, ya que representan, en promedio, el 45% de los ingresos totales de los hogares de esta región (Vasco y Tamayo, 2017).

La concentración de la tierra es más marcada en las tierras altas que en el resto de las regiones geográficas del Ecuador, con un coeficiente de Gini de 0,81. La distribución desigual de los recursos (es decir, la tierra y el agua de riego) amenaza los medios de vida de muchos pequeños agricultores, principalmente la población indígena, que representa el 20% de la población rural total de las tierras altas (INEC, 2010). El *chakra andina* es el sistema tradicional más común en las tierras altas. Es un agrosistema ampliamente utilizado por las poblaciones indígenas, que se caracteriza por altos niveles de biodiversidad y un complejo sistema de conservación de semillas y adaptación varietal en diferentes niveles altitudinales (2400-3500 m) (Intriago y cols., 2017). Los pequeños agricultores que practican el *chakra andina* han sido capaces de desarrollar métodos ingeniosos para la gestión ecológica de los suelos, el agua y los recursos genéticos. No obstante, se ha informado que el acceso limitado a la tierra y al agua, junto con la fragmentación de la tierra, amenazan el *chakra andina* (Gortaire, 2016), ya que, en algunas zonas, el tamaño de las explotaciones es demasiado pequeño para mantener y alimentar a las familias rurales.

La *Amazonía* ecuatoriana es uno de los puntos críticos de biodiversidad del mundo. Es el hogar de varios pueblos indígenas que han vivido en la zona desde hace mucho tiempo y representan el 47% de la población rural, mientras que el resto son princi-

palmente mestizos colonos que emigraron desde la región costera y las tierras altas a partir de la década de 1960 (INEC, 2010). La agricultura sigue siendo una actividad incipiente debido a la baja fertilidad de los suelos, la deficiente red de carreteras y la lejanía de los principales mercados agrícolas (Vasco Pérez y cols., 2015). Los colonos mestizos suelen dedicarse a actividades insostenibles, como la tala de bosques, la ganadería y los monocultivos, por lo que las tasas de deforestación en los territorios controlados por los colonos se sitúan entre las más altas de los países amazónicos (Bilsborrow y cols., 2004).

Por el contrario, se sabe que los pueblos indígenas obtienen sus medios de vida de la agricultura de subsistencia y utilizan prácticas agrícolas con bajo impacto ambiental (Nuckolls, 2010). La mayoría de los pueblos indígenas de la *Amazonía* practican la *chakra amazónica*, que se trata de un sistema agroforestal tradicional que se caracteriza por altos niveles de biodiversidad y que combina cultivos de subsistencia (por ejemplo, plátanos y yuca) con cultivos comerciales (por ejemplo, cacao y café) y que ha demostrado ser eficaz para proporcionar alimentos e ingresos a los pueblos indígenas, al tiempo que tiene un bajo impacto ambiental, ya que normalmente no requiere el uso de insumos externos (es decir, fertilizantes químicos y pesticidas) (Coq-Huelva y cols., 2017). Aunque está profundamente arraigado en la cultura de los pueblos amazónicos, los factores como la penetración de la economía de mercado y la adopción del monocultivo podrían ser perjudiciales para la continuidad de la *chakra amazónica* (Vasco, Torres, y cols., 2021).

3 Métodos

3.1 Datos y variables

Los datos proceden de la Encuesta de Medición de la Calidad de Vida 2013-2014 (EMCV 2013-2014) realizada por el Instituto Nacional de Estadística (INE). Se trata de un conjunto de datos transversales con representación nacional que incluye una sección completa sobre vivienda, composición del hogar, salud, educación, activos del hogar y acti-

vidades económicas de un total de 28 970 hogares (INEC, 2014). La encuesta también incorpora una sección sobre actividades agrícolas, que incluye información sobre el tamaño de la propiedad, la producción agrícola y ganadera, los rendimientos, los equipos agrícolas y las inversiones, lo que la hace útil para los objetivos de este estudio. Para el análisis, seleccionamos los hogares que declararon haber producido al menos un cultivo durante los doce meses anteriores a la recopilación de datos, lo que dio como resultado una muestra de 9819 hogares distribuidos de la siguiente manera: 5619 hogares en la *Sierra*, 1942 en la *Costa* y 2258 en la *Amazonía*¹.

Las variables dependientes de interés fueron la riqueza de cultivos, es decir, el número de especies cultivadas en una explotación agrícola, y una variable binaria que toma el valor 1 si el hogar practica el monocultivo y 0 en caso contrario (véase la tabla 1 para las definiciones). En cuanto a las variables independientes, incluimos una serie de predictores de cabeza de familia que se espera que tengan un efecto sobre las variables dependientes objeto de estudio. El primer grupo, los predictores de cabeza de familia, incluye la edad del jefe y una variable binaria que toma el valor 1 si la cabeza de familia es una mujer y 0 en caso contrario. Dos variables binarias que toman el valor 1 si el jefe se define a sí mismo como indígena o afroecuatoriano, respectivamente, controlan el efecto de la etnicidad en las variables analizadas. El grupo de personas que se definen como mestizas —el más numeroso de la muestra— se deja como grupo de comparación. Además, se utilizan tres variables binarias que toman el valor 1 si la cabeza de familia es analfabeta, ha completado la educación secundaria o tiene un título universitario, respectivamente, para controlar el papel de la educación. Los que solo han completado la educación primaria se dejan como grupo de referencia. Las investigaciones anteriores (Perrault-Archambault y Coomes, 2008; Torres y cols., 2018; Abril Saltos y cols., 2016) informaron que estos predictores ejercían un efecto significativo sobre el número de cultivos en una finca.

A nivel de los hogares, el tamaño del hogar y una variable binaria que toma el valor 1 si el hogar ha contratado mano de obra familiar adicional con-

¹Aunque el LSMS 2013-2014 incluye hogares de las islas Galápagos (la región insular de Ecuador), no se ha tomado cuenta esa región en el presente análisis, ya que el número de hogares dedicados a la producción agrícola (56) era demasiado reducido para realizar un análisis multivariante.

trolan la disponibilidad de mano de obra. Además, incluimos el número de migrantes internos e internacionales, ya que estos predictores pueden reducir la mano de obra del hogar para las actividades agrícolas (Gray, 2009). El tamaño de la explotación y la superficie que ha arrendado durante los doce meses anteriores a la encuesta. En general, se considera que los agrosistemas diversificados tienen un bajo impacto ambiental y utilizan pocos insumos externos (Coq-Huelva y cols., 2018). Para comprobar esta hipótesis, se utilizó una variable ficticia, que toma el valor 1 si el hogar ha utilizado pesticidas durante los doce meses anteriores a la recopilación de datos. Se espera que el empleo fuera de la explotación agrícola ejerza un efecto negativo en la diversidad de cultivos, ya que se retira mano de obra de la explotación, de modo que los hogares que se dedican a trabajos fuera de la explotación pueden carecer de la mano de obra necesaria para mantener una explotación diversificada (Fatch y cols., 2020; Torres y cols., 2018). Para controlar esta posible variable, nuestra especificación incluye una variable binaria que toma el valor 1, lo que significa que el hogar recibe ingresos no agrícolas.

Para aproximar las condiciones económicas de los hogares se utiliza un índice de riqueza², el número de cabezas de ganado que posee un hogar y una variable ficticia que toma el valor 1 si el hogar se beneficia o no del programa social *Bono de Desarrollo Humano*³. De igual forma, también incluimos como covariable una variable ficticia que indica si el hogar ha recibido un préstamo durante los 12 meses anteriores a la encuesta. El papel de la infraestructura vial en la toma de decisiones sobre el número de especies que se cultivan se controla mediante una variable ficticia que toma el valor 1 si el hogar es accesible por carretera. Por último, el modelo incluye dos variables binarias que indican si el hogar está situado en la *Costa* o en la *Amazonía*, tomando como grupo de referencia los hogares situados en la *Sierra*.

3.2 Métodos estadísticos

Se utilizó la regresión multivariante para encontrar los determinantes socioeconómicos de la diversidad de cultivos y la adopción del monocultivo. Antes

de continuar, cabe señalar que puede haber características inherentes a una zona específica que no se tienen en cuenta en el modelo. Estas variables contextuales pueden influir en las decisiones de los hogares sobre el número de cultivos que se van a plantar. El ignorar la naturaleza jerárquica de los datos puede dar lugar a resultados erróneos e interpretaciones engañosas. Para controlar la naturaleza jerárquica de los datos, utilizamos modelos multinivel, que se utilizan habitualmente en las ciencias ambientales y son útiles para controlar los diseños de muestreo agrupados y modelar los efectos contextuales (Wikle, 2003). Por lo tanto, en el caso de la riqueza de especies, nos basamos en un modelo lineal multinivel:

$$Y_{ij} = \alpha + X_{ij}\beta + \varepsilon_{ij} + u_j \quad (1)$$

Donde Y es el número de cultivos que el hogar i del cantón j ha cultivado en los doce meses anteriores a la recopilación de datos, α es la intersección, X es un vector de covariables que se han enumerado y descrito anteriormente, β es un vector de coeficientes, cuyo tamaño y dirección nos interesa conocer, ε representa el término de error a nivel del hogar y u es el término de error a nivel del cantón.

En cuanto a la probabilidad de que un hogar adopte el monocultivo, se estimó utilizando un modelo logístico multinivel:

$$\Pr(Y_{ij} = 1 | X_{ij}, u_j) = H(X_{ij}\beta + z_{ij}u_j) \quad (2)$$

Donde Y es una variable binaria que toma el valor 1 si el hogar i del cantón j adoptó el monocultivo, X es un vector de las covariables ya descritas, u es un conjunto de efectos aleatorios a nivel de cantón, H es la función de distribución acumulativa logística, β es un vector de coeficientes y z son las covariables de los efectos aleatorios. Dado que los coeficientes de un modelo logit no se interpretan directamente, en la sección de resultados presentamos y discutimos los efectos marginales de cada predictor.

²El índice era el componente principal de la posesión de radio, televisión, teléfono móvil, ordenador, cocina de gas, frigorífico, carro y motocicleta. El primer componente principal explica el 31% de la varianza.

³El Bono de Desarrollo Humano es una transferencia condicional del gobierno que otorga 50 dólares estadounidenses a los hogares que viven por debajo del umbral de pobreza, con la condición de que el dinero se gaste en salud y educación.

Tabla 1. Estadísticas descriptivas y definiciones de variables

Variable	Descripción	Media	Desviación estándar
VARIABLES DEPENDIENTES			
Riqueza de los cultivos	Número de cultivos que cultiva un hogar.	3,811	2,838
Monocultivo	El hogar ha adoptado el monocultivo (0/1).	0,138	–
VARIABLES INDEPENDIENTES			
Edad	Edad de la cabeza de familia (años).	51,798	16,424
Mujer	La cabeza de familia es una mujer (0/1).	0,190	–
Mestizo	La cabeza de familia es una persona mestiza (0/1).	0,583	–
Indígena	La cabeza de familia es una persona indígena (0/1).	0,307	–
Afroecuatoriano	La cabeza de familia es una persona afroecuatoriana (0/1).	0,024	–
Analfabeto	La cabeza de familia es analfabeta (0/1).	0,153	–
Educación primaria	La cabeza de familia ha completado la educación primaria (0/1).	0,623	–
Educación secundaria	La cabeza de familia ha completado la educación secundaria (0/1).	0,179	–
Título universitario	La cabeza de familia tiene un título universitario (0/1).	0,043	–
Tamaño del hogar	Número de miembros del hogar.	4,122	2,243
Mano de obra contratada	El hogar tiene mano de obra contratada (0/1).	0,223	–
Migrantes internos	Número de migrantes internos.	0,196	0,707
Migrantes internacionales	Número de migrantes internacionales.	0,021	0,239
Tamaño de la propiedad	Tamaño de la explotación agrícola (ha).	10,836	212,641
Tierras arrendadas	Superficie de tierras arrendadas (ha).	1,920	112,765
Pesticidas	El hogar ha utilizado pesticidas (0/1).	0,438	–
Empleo fuera de la explotación agrícola	El hogar tiene empleo fuera de la agricultura (0/1).	0,377	–
Índice de riqueza	Índice de riqueza del hogar.	-0,012	1,710
Ganado	Número de cabezas de ganado.	2,440	7,087
Bono	El hogar recibió el Bono de Desarrollo Humano (0/1).	0,589	–
Crédito	El hogar ha recibido crédito (0/1).	0,127	–
Carretera	El hogar está situado junto a una carretera (0/1).	0,753	–
Sierra	El hogar está situado en la Sierra (0/1).	0,572	–
Costa	El hogar está situado en la Costa (0/1).	0,197	–
Amazonía	El hogar está situado en la Amazonía (0/1).	0,229	–

Nota: (0/1) identifica variables ficticias.

4 Resultados

4.1 Riqueza de los cultivos

La columna I de la tabla 2 muestra los resultados de una regresión por mínimos cuadrados ordinarios (OLS) con la riqueza de especies como variable dependiente. Se observa un comportamiento cuadrático con respecto a la edad de la cabeza de familia, ya que el número de especies cultivadas aumenta con la edad hasta un umbral de 53 años y luego disminuye. El hecho de que la cabeza de familia sea una mujer reduce el número de especies cultivadas en 0,192. Como era de esperar, los hogares cuya cabeza de familia se define a sí mismo como indígena aumentan la riqueza de especies en 0,588. Por el contrario, nuestros resultados muestran que los hogares con cabezas de familia afroecuatorianos cultivan menos especies que sus homólogos mestizos.

En cuanto a los predictores de educación, la variable ficticia que tiene en cuenta el hecho de tener un título universitario tiene un efecto negativo en el número de especies. Tener un título universitario reduce en 0,325 el número de cultivos que cultiva un hogar. Cada nuevo miembro del hogar aumenta el número de cultivos producidos por un hogar en 0,10. En promedio, los hogares que tienen empleo fuera de la agricultura cultivan menos que sus homólogos que no se dedican a actividades fuera de la agricultura.

Los hogares que se benefician del *Bono de Desarrollo Humano* cultivan más que sus homólogos que no lo reciben. Recibir el BDH aumenta en 0,23, en promedio, el número de cultivos que produce un hogar. La proximidad a las carreteras tiene un efecto negativo en la riqueza de especies, ya que los hogares situados junto a una carretera tienen, en promedio, 0,33 especies de cultivos menos que los que no están conectados a la red de carreteras. Por último, los resultados revelan que existen diferencias geográficas en términos de riqueza de especies. Los hogares situados en la región costera cultivan, en promedio, 0,51 especies menos que sus homólogos de la *Sierra*.

Las columnas 2-4 presentan regresiones independientes para cada región. Si bien la mayoría de los coeficientes permanecen inalterados, el tamaño

de la propiedad de la tierra se vuelve significativo en la regresión de la *Sierra*. En el caso de la *Costa*, la variable ficticia que controla la recepción del *Bono de Desarrollo Humano* ya no es significativa, mientras que en la *Amazonía*, el efecto del jefe de familia femenino ya no es significativo.

4.2 Adopción del monocultivo

Los resultados de un modelo logit multinivel se muestran en la columna I de la tabla 3. La probabilidad de adoptar el monocultivo aumenta con la edad hasta un umbral de 73 años y luego disminuye. Como era de esperar, los hogares indígenas son menos propensos a adoptar el monocultivo. Tener un jefe indígena reduce las probabilidades de adoptar el monocultivo en un 4%. El tamaño del hogar tiene un efecto negativo en la probabilidad de adoptar el monocultivo. Cada nuevo miembro del hogar aumenta las probabilidades de monocultivo en un 0,7%. Los hogares que utilizan pesticidas son un 2,7% más propensos a practicar el monocultivo.

Tener ingresos no agrícolas aumenta la probabilidad de adoptar el monocultivo en un 2,8%. Cada cabeza de ganado que posee un hogar reduce la probabilidad de monocultivo en un 0,1%. Contrariamente a los resultados sobre la riqueza de cultivos, recibir el *Bono de Desarrollo Humano* reduce la probabilidad de practicar el monocultivo en un 2,2%. Los hogares situados junto a una carretera son un 4,4% más propensos a adoptar el monocultivo. En consonancia con los resultados relativos a la riqueza de cultivos, los hogares que residen en la región costera son un 5,7% más propensos a practicar el monocultivo que sus homólogos de la *Sierra*. Por el contrario, los hogares amazónicos son menos propensos a practicar el monocultivo, el residir en la *Amazonía* reduce la probabilidad de adoptar el monocultivo en un 5,5%.

Si bien la mayoría de los coeficientes permanecen sin cambios cuando se realizan regresiones independientes para cada región (columnas II-IV), la variable ficticia que tiene en cuenta el jefe de familia indígena y el número de cabezas de ganado ya no es significativa en la *Sierra*. El efecto de la edad ya no es significativo en las regresiones para la *Costa* y la *Amazonía*.

Tabla 2. Determinantes socioeconómicos de la riqueza de cultivos (OLS)

Variable	Riqueza de cultivos			
	Total (I)	Sierra (II)	Costa (III)	Amazonía (IV)
Edad	0,070***	0,067***	0,083***	0,068***
Edad al cuadrado	-0,000***	-0,000***	-0,000***	-0,000***
Mujer (0/1)	-0,192***	-0,146*	-0,413	-0,157
Indígena (0/1)	0,588***	0,456***	-0,518	0,762***
Afroecuatoriano (0/1)	-0,401**	-0,307	-0,444	-0,608
Analfabeto (0/1)	-0,042	-0,012	0,014	-0,066
Educación secundaria (0/1)	-0,102	-0,203	0,018	0,035
Título universitario (0/1)	-0,325***	-0,637***	0,065	0,097
Tamaño del hogar	0,102***	0,129	0,052	0,078
Mano de obra contratada (0/1)	0,486	0,573	0,363	0,435
Migrantes internos	-0,049	-0,070	0,018	-0,054
Migrantes internacionales	-0,003	-0,073	-0,105	0,217
Tamaño de la propiedad	-0,000	0,005***	-0,000	0,000
Tierras arrendadas	-0,000	-0,008	-0,000	-0,004
Pesticidas (0/1)	0,799	0,934	0,645	0,574
Empleo fuera de la explotación agrícola (0/1)	-0,566***	-0,601***	-0,369	-0,601***
Índice de riqueza	0,017	0,020	0,059	-0,040
Ganado	0,003	0,000	-0,002	0,014*
Bonificación (0/1)	0,232	0,283	0,093	0,280***
Crédito (0/1)	0,081	0,155	-0,094	-0,070
Carretera (0/1)	-0,339	-0,232***	-0,674	-0,341***
Costa (0/1)	-0,524***	-	-	-
Amazonía (0/1)	0,199	-	-	-
Correlación intraclase	4,792***	3,187***	2,447***	3,125***
Número de cantones	659	348	187	124
Número de observaciones	9 819	5 619	1 942	2 258
Prueba de Wald	880***	586***	180***	204***

Nota: *, ** y *** indican significación estadística al 10, 5 y 1 %, respectivamente. (0/1) identifica variables ficticias.

Tabla 3. Determinantes socioeconómicos de la adopción del monocultivo (logit)

Variable	Adopción del monocultivo			
	Total (I)	Sierra (II)	Costa (III)	Amazonía (IV)
Edad	0,003**	-0,004***	-0,000	-0,000
Edad al cuadrado	-0,000**	0,000	2,61	2,61
Mujer (0/1)	0,001	-0,012	0,002	0,002
Indígena (0/1)	-0,039***	-0,014	-0,057***	-0,057***
Afroecuatoriano (0/1)	0,008	0,097	0,017	0,017
Analfabeta (0/1)	0,014	0,015	0,000	0,000
Educación secundaria (0/1)	-0,003	-0,006	0,007	0,007
Título universitario (0/1)	0,017	0,047*	-0,002	-0,002
Tamaño del hogar	-0,007***	-0,000***	-0,003*	-0,003*
Mano de obra contratada (0/1)	0,025	0,001	0,004	0,004
Migrantes internos	-0,003	0,004	-0,002	-0,002
Migrantes internacionales	0,012	0,017	-0,001	-0,001
Tamaño de la explotación agrícola	0,000	-0,000	-0,000	-0,000
Tierras arrendadas	-0,000	0,001	-0,004	-0,004
Pesticidas (0/1)	0,027***	0,021***	0,016	0,016
Empleo fuera de la explotación agrícola (0/1)	0,028	0,020	-0,001	-0,001
Índice de riqueza	0,000	0,001	0,002	0,002
Ganado	-0,001**	-0,000	-0,003***	-0,003
Bono (0/1)	-0,022***	-0,032***	-0,006	-0,006
Crédito (0/1)	-0,006	0,002	-0,004	-0,004
Carretera (0/1)	0,044***	0,033	0,027	0,027
Costa (0/1)	0,057***	–	–	–
Amazonía (0/1)	-0,055***	–	–	–
Correlación intraclase	1,56***	1,75***	2,45***	1,98***
Número de cantones	659	348	187	124
Número de observaciones	9819	5 619	1 942	2 258
Prueba de Wald	193***			

Nota: *, ** y *** indican significación estadística al 10%, 5% y 1%, respectivamente. (0/1) identifica variables ficticias.

5 Discusión

Los datos sugieren que las decisiones de mantener explotaciones agrícolas diversificadas o dedicarse al monocultivo dependen principalmente del origen étnico, el nivel educativo, la disponibilidad de mano de obra y la pobreza. En el caso del origen étnico, los resultados muestran que los indígenas tienen explotaciones agrícolas más diversificadas. Este hallazgo no es sorprendente, ya que, como se ha mencionado anteriormente en la sección 2, se sabe que los pueblos indígenas mantienen agrosistemas caracterizados por altos niveles de biodiversidad (Gortaire, 2016).

Este patrón ocurre en la *Sierra* y la *Amazonía*, pero no en la *Costa*, probablemente porque la población indígena en esa región es escasa (INEC, 2010). Sorprendentemente, los resultados muestran que los pueblos indígenas de la *Sierra* son igual de propensos que sus homólogos mestizos a dedicarse al monocultivo, lo que debería causar preocupación debido a la importancia que tiene la agricultura indígena en la preservación y la promoción de la agricultura sostenible (Parraguez-Vergara y cols., 2018). Sin embargo, las poblaciones indígenas de la *Amazonía* son menos propensas a dedicarse al monocultivo, probablemente debido a la importancia social, cultural y económica que tiene el sistema de *chakras* entre los pueblos indígenas de la *Amazonía* (Coq-Huelva y cols., 2018). Las poblaciones afroecuatorianas de la *Costa* tienen explotaciones menos diversificadas que sus homólogos mestizos, lo que sugiere que se dedican más a la agricultura comercial.

Mientras que en la *Costa* y la *Amazonía* la educación no ejerce ningún efecto significativo sobre la riqueza de los cultivos y la adopción del monocultivo, en la *Sierra*, los hogares cuyos jefes tienen un título universitario tienen explotaciones menos diversificadas. Esto puede significar que los hogares con mayor nivel educativo se dedican a la producción de cultivos comerciales y, por lo tanto, tienen explotaciones menos diversificadas. Si bien el aumento de la educación en las zonas rurales se considera una prioridad para el desarrollo, este hallazgo refleja una externalidad negativa de la educación en lo que respecta a la promoción de la agricultura sostenible, por lo que los políticos deberían centrarse en desarrollar planes de estudio que hagan hincapié

en la importancia de la agricultura sostenible y los agrosistemas diversificados (Vasco, Tafur, y cols., 2021).

Los resultados reflejan que la mano de obra es un elemento clave para mantener explotaciones agrícolas diversificadas. En general, los hogares más grandes tienen explotaciones más diversificadas y son menos propensos a dedicarse al monocultivo. Las investigaciones anteriores (Vasco, Tafur, y cols., 2021) ya han demostrado que los hogares más grandes, con más mano de obra pueden mantener más cultivos. Esto también concuerda con Chayanov al indicar que la agricultura campesina, como la que se practica en los agrosistemas tradicionales, ha podido sobrevivir e incluso competir con la agricultura moderna, basándose principalmente en la mano de obra familiar (Chayanov, 1966). También en relación con la disponibilidad de mano de obra, los resultados muestran que las explotaciones que cultivan más productos necesitan contratar mano de obra externa al hogar, lo que confirma que la mano de obra es un elemento clave para el desarrollo de la agricultura sostenible. En este sentido, los políticos deberían centrar sus esfuerzos en desarrollar tecnologías que ahorren mano de obra para los pequeños agricultores.

Los hogares que tienen trabajo fuera de la agricultura tienen explotaciones menos diversificadas. Existen tres posibles argumentos que podrían explicar este hallazgo. En primer lugar, es posible que estos hogares dispongan de menos mano de obra para la producción agrícola, por lo que no pueden cultivar muchos productos en sus explotaciones (Torres y cols., 2018). En segundo lugar, también es posible que la agricultura no sea una prioridad para este tipo de hogares, ya que los ingresos procedentes del empleo no agrícola suelen ser significativamente más elevados que los que se obtienen de la producción agrícola (Vasco y Tamayo, 2017). En tercer lugar, es probable que los ingresos procedentes del trabajo no agrícola se inviertan en la producción agrícola convencional (Angelsen y Kaimowitz, 2001).

Recibir el *Bono de Desarrollo Humano* se correlaciona positivamente con la riqueza de cultivos y negativamente con la probabilidad de adoptar el monocultivo. En el primer caso, una posible explicación es que los hogares pobres, como los que se

benefician de la ayuda social, carecen de recursos para comprar alimentos en el mercado, por lo que deben depender de lo que producen en sus granjas. Dado que este tipo de hogares dependen de la agricultura de subsistencia, deben mantener granjas diversificadas para satisfacer sus necesidades alimentarias. En el caso de la adopción del monocultivo, la correlación negativa puede reflejar que los agricultores pobres carecen de los recursos necesarios para dedicarse a la agricultura comercial. Del mismo modo, puede indicar que los agricultores pobres necesitan producir muchos cultivos, ya que no pueden comprar alimentos en los mercados (Vasco, Tafur, y cols., 2021). Más allá de estos argumentos, estos hallazgos confirman la importancia de los agrosistemas diversificados para la seguridad alimentaria, la soberanía alimentaria y la mitigación de la pobreza de la población rural en los países en desarrollo (Altieri y cols., 2012).

La accesibilidad es otro factor que influye en la riqueza de los cultivos y la adopción del monocultivo. Los hogares situados junto a una carretera tienen explotaciones agrícolas menos diversificadas y son más propensos a adoptar sistemas de producción insostenibles. Las carreteras facilitan el transporte de los productos agrícolas a los mercados urbanos; por lo tanto, los hogares situados junto a una carretera pueden verse animados a abandonar la agricultura tradicional en favor de una agricultura comercial más rentable (es decir, el monocultivo). Al igual que en el caso de la educación, la construcción de carreteras en las zonas rurales se considera una prioridad de desarrollo para mejorar los medios de vida de la población rural, ya que puede facilitar el transporte de bienes y servicios (Vasco, Tamayo, y Griess, 2017). Sin embargo, esta política puede tener consecuencias negativas, como el aumento de las tasas de deforestación (Vasco, Torres, y cols., 2017) y, como se muestra aquí, el fomento de prácticas insostenibles entre la población rural.

Cabe señalar que existen diferencias regionales. La riqueza de cultivos es menor en la *Costa* que en la *Sierra*. Una posible explicación de este hallazgo es que, como se mencionó anteriormente en la sección 2, la mayoría de los productos básicos exportables de Ecuador se producen en la costa; por lo tanto, los hogares de esa región pueden mostrar un fuerte impulso hacia la producción de cultivos comerciales (Vasco y Tamayo, 2017) y, en gran medida, han

abandonado los sistemas de producción tradicionales. La probabilidad de adoptar el monocultivo es mayor en la *Sierra* que en la *Amazonía*, lo que puede estar relacionado con el hecho de que el sector agrícola en la Amazonía aún es incipiente (Sellers y cols., 2017) y con que muchos pueblos indígenas amazónicos practican el sistema tradicional del *chakra* (Coq-Huelva y cols., 2017).

6 Conclusiones e implicaciones políticas

En este documento se han analizado los factores determinantes de la riqueza de cultivos y la adopción del monocultivo en Ecuador. Los resultados muestran que los hogares indígenas grandes que reciben el *Bono de Desarrollo Humano* tienen una mayor riqueza de cultivos en sus explotaciones. Por el contrario, los hogares encabezados por personas que han completado la universidad, tienen ingresos no agrícolas y están situados junto a una carretera, cultivan menos. En cuanto al monocultivo, la probabilidad de adoptar este sistema es mayor en los hogares que utilizan pesticidas, tienen trabajo fuera de la explotación y residen junto a una carretera. Por otro lado, los hogares indígenas que reciben el *Bono de Desarrollo Humano* son los menos propensos a dedicarse al monocultivo. Más allá de estas conclusiones, este documento también ofrece algunas recomendaciones de política.

En primer lugar, nuestros resultados coinciden con la bibliografía (Altieri y cols., 2012; Altieri, 2009; Astier y cols., 2017), que destaca la importancia de la agricultura indígena para preservar y promover sistemas agrícolas sostenibles. Si bien nuestros hallazgos muestran que los hogares indígenas tienen una mayor diversidad de cultivos en sus fincas y son más reacios a participar en prácticas insostenibles (es decir, el monocultivo), las investigaciones abordan que, cuando entran en contacto con la economía de mercado, las poblaciones indígenas también participan en prácticas insostenibles, como el monocultivo y el uso de pesticidas (Vasco, Torres, y cols., 2021). En este sentido, los responsables políticos deberían centrarse en rescatar y promover la adopción de los sistemas de producción tradicionales entre los pueblos indígenas.

En segundo lugar, el mantenimiento de una explotación agrícola diversificada parece exigir una gran cantidad de mano de obra tanto familiar como extrafamiliar. Esto concuerda con las críticas a la agricultura campesina, que sostienen que depende de la sobre explotación de la mano de obra familiar, más que de la capacidad de los agricultores para adaptarse a los cambios del entorno y de sus conocimientos técnicos (Heynig, 1982). En cualquier caso, si la adopción de sistemas sostenibles es una prioridad para el desarrollo rural, los esfuerzos en la investigación deberían orientarse al desarrollo de tecnologías que ahorren mano de obra para los sistemas de producción tradicionales.

En tercer lugar, los resultados aquí presentados sugieren que la diversidad de cultivos es mayor en los hogares que reciben ayuda social del gobierno. Si bien esto sugiere que los hogares desfavorecidos no tienen los recursos para comprar alimentos en el mercado y, por lo tanto, deben producir la mayor parte de los alimentos que consumen, también refleja que los agrosistemas diversificados son fundamentales para la seguridad alimentaria de los hogares rurales pobres. En este sentido, las políticas orientadas a reducir la pobreza y el hambre en las zonas rurales deben centrarse en promover los sistemas alimentarios tradicionales y sostenibles como herramienta para mejorar la seguridad alimentaria en las zonas rurales.

Contribución de los autores

C.L.V.P.: Conceptualización, análisis formal, investigación, metodología, software, escritura del borrador original, revisión y edición del manuscrito.
L.J.C.L.: Curación de datos, validación, software, revisión y edición del manuscrito.

Referencias

- Abdoellah, O. S., Hadikusumah, H. Y., Takeuchi, K., y Okubo, S. (2006). Commercialisation of homegardens in an Indonesian village: vegetation composition and functional changes. En *Tropical homegardens*. Springer. Online: <https://doi.org/10.1007/s10457-005-7475-x>
- Abebe, T. (2013). Determinants of crop diversity and composition in enset-coffee agroforestry homegardens of southern Ethiopia. *Journal of Agriculture and Rural Development in the Tropics and Subtropics*, 114, 29–38.
- Abril Saltos, R. V., Ruíz Vásquez, T. E., Lazo, J. A., Viáfara Banguera, D., Ríos Guayasamín, P. D., Aguinda Vargas, J. K., y Vega Peñas, I. (2016). The use of medicinal plants by rural populations of the pastaza province in the Ecuadorian Amazon. *Acta Amazonica*, 46, 355–366. Online: <https://doi.org/10.1590/1809-4392201600305>
- Altieri, M. A. (2002). Agroecology: the science of natural resource management for poor farmers in marginal environments. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 93, 1–24. Online: [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(02\)00085-3](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(02)00085-3)
- Altieri, M. A. (2009). Agroecology, small farms, and food sovereignty. *Monthly Review*, 61, 102–113. Online: https://doi.org/10.14452/MR-061-03-2009-07_8
- Altieri, M. A., Funes-Monzote, F. R., y Petersen, P. (2012). Agroecologically efficient agricultural systems for smallholder farmers: contributions to food sovereignty. *Agronomy for Sustainable Development*, 32, 1–13. Online: <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0065-6>
- Angelsen, A., y Kaimowitz, D. (2001). Introduction: the role of agricultural technologies in tropical deforestation. En A. Angelsen y D. Kaimowitz (Eds.), *Agricultural technologies and tropical deforestation*. London: CABI.
- Astier, M., Argueta, J. Q., Orozco-Ramírez, Q., González, M. V., Morales, J., Gerritsen, P. R., ... Martínez Saldaña, T. (2017). Back to the roots: understanding current agroecological movement, science, and practice in Mexico. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 41, 329–348. Online: <https://doi.org/10.1080/21683565.2017.1287809>
- BCE. (2019). *Evolución de la balanza comercial enero – octubre 2019* (Inf. Téc.). Quito, Ecuador: Banco Central del Ecuador. Online: <https://n9.cl/mf45b>
- Bilsborrow, R. E., Barbieri, A. F., y Pan, W. (2004). Changes in population and land use over time in the Ecuadorian Amazon. *Acta Amazonica*, 34, 635–647. Online: <https://doi.org/10.1590/S0044-59672004000400015>

- Brassel, F., Ruiz, P., y Zapatta, A. (2010). La estructura agraria en el Ecuador: una aproximación a su problemática y tendencias. En *Reforma agraria en el Ecuador*. Online: <https://n9.cl/o0n53x>
- Chayanov, A. (1966). *The theory of peasant economy*. Homewood, Illinois: The American Economic Association.
- Comoretto, L., Arfib, B., Talva, R., Chauvelon, P., Pichaud, M., Chiron, S., y Höhener, P. (2008). Runoff of pesticides from rice fields in the ile de camargue (rhône river delta, france): Field study and modeling. *Environmental Pollution*, 151, 486–493. Online: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.04.021>
- Coq-Huelva, D., Higuchi, A., Alfalla-Luque, R., Burgos-Morán, R., y Arias-Gutiérrez, R. (2017). Co-evolution and bio-social construction: The kichwa agroforestry systems (chakras) in the Ecuadorian Amazonia. *Sustainability*, 9, 1920. Online: <https://doi.org/10.3390/su9101920>
- Coq-Huelva, D., Torres-Navarrete, B., y Bueno-Suárez, C. (2018). Indigenous worldviews and western conventions: Sumak kawsay and cocoa production in Ecuadorian Amazonia. *Agriculture and Human Values*, 35, 163–179. Online: <https://doi.org/10.1007/s10460-017-9812-x>
- FAO. (2021). *Ecuador en una mirada*. Online: <https://n9.cl/3a4zx> ([Accessed])
- Fatch, P. F., Masangano, C., Kamoto, J., Jordan, I., Hilger, T., Mambo, I., ... Nuppenau, E.-A. (2020). Are farmer perceptions among significant determinants of adoption of agricultural diversity in Malawi? a case of Lilongwe district. *Journal of Agriculture and Rural Development in the Tropics and Subtropics*, 121, 277–288.
- Gortaire, R. (2016). Agroecología en el Ecuador. proceso histórico, logros, y desafíos. *Antropología: Cuadernos de Investigación*, 12–38. Online: <https://n9.cl/q80ic>
- Gray, C. L. (2009). Rural out-migration and smallholder agriculture in the southern Ecuadorian Andes. *Population and Environment*, 30, 193–217. Online: <https://doi.org/10.1007/s11111-009-0081-5>
- Heynig, K. (1982). Principales enfoques sobre la economía campesina. *Revista de la CEPAL*, 16, 115–142. Online: <https://n9.cl/1arxpe>
- Hofstede, R., Lips, J., y Jongsma, W. (1998). *Geografía, ecología y forestación de la sierra alta del Ecuador: Revisión de literatura*. Quito, Ecuador: Abya-Yala.
- Holt-Giménez, E., y Altieri, M. A. (2013). Agroecology, food sovereignty, and the new green revolution. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 37, 90–102. Online: <https://doi.org/10.1080/10440046.2012.716388>
- INEC. (2010). *Censo de población y vivienda* (Inf. Téc.). Quito, Ecuador: Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. Online: <https://n9.cl/hd1t>
- INEC. (2014). *Metodología de la encuesta de condiciones de vida (ecv) 2013-2014* (Inf. Téc.). Quito, Ecuador: Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. Online: <https://n9.cl/nh8x>
- INEC. (2021). *Boletín técnico encuesta de superficie y producción agropecuaria continua (espac), 2020* (Inf. Téc.). Quito, Ecuador: Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. Online: <https://n9.cl/89lq7>
- Intriago, R., Gortaire Amézcuca, R., Bravo, E., y O'Connell, C. (2017). Agroecology in Ecuador: historical processes, achievements, and challenges. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 41, 311–328. Online: <https://doi.org/10.1080/21683565.2017.1284174>
- Lambin, E. F., Turner, B. L., Geist, H. J., Agbola, S. B., Angelsen, A., Bruce, J. W., ... Folke, C. (2001). The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. *Global Environmental Change*, 11, 261–269. Online: [https://doi.org/10.1016/S0959-3780\(01\)00007-3](https://doi.org/10.1016/S0959-3780(01)00007-3)
- MAE. (2013). *Sistema de clasificación de los ecosistemas del Ecuador continental* (Inf. Téc.). Ministerio del Ambiente del Ecuador. Online: <https://n9.cl/6y7dy>
- Nuckolls, J. B. (2010). *Lessons from a quechua strong-woman: Ideophony, dialogue, and perspective*. Tucson, AZ: University of Arizona Press.
- Ongley, E. D., Xiaolan, Z., y Tao, Y. (2010). Current status of agricultural and rural non-point source pollution assessment in China. *Environmental Pollution*, 158, 1159–1168. Online: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2009.10.047>

- Parraguez-Vergara, E., Contreras, B., Clavijo, N., Villegas, V., Paucar, N., y Ther, F. (2018). Does indigenous and campesino traditional agriculture have anything to contribute to food sovereignty in latin america? evidence from chile, peru, ecuador, colombia, guatemala and mexico. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 16, 326–341. Online: <https://doi.org/10.1080/14735903.2018.1489361>
- Perrault-Archambault, M., y Coomes, O. T. (2008). Distribution of agrobiodiversity in home gardens along the corrientes river, peruvian amazon. *Economic Botany*, 62, 109–126. Online: <https://doi.org/10.1007/s12231-008-9010-2>
- Sellers, S., Bilsborrow, R., Salinas, V., y Mena, C. (2017). Population and development in the amazon: A longitudinal study of migrant settlers in the northern ecuadorian amazon. *Acta Amazonica*, 47, 321–330. Online: <https://doi.org/10.1590/1809-4392201602663>
- Torres, B., Maza, O., Aguirre, P., Hinojosa, L., y Günter, S. (2015). The contribution of traditional agroforestry to climate change adaptation in the ecuadorian amazon: The chakra system. En *Handbook of climate change adaptation* (pp. 1973–1994). Online: <http://dx.doi.org/10.5061/dryad.234>
- Torres, B., Vasco, C., Günter, S., y Knoke, T. (2018). Determinants of agricultural diversification in a hotspot area: evidence from colonist and indigenous communities in the sumaco biosphere reserve, ecuadorian amazon. *Sustainability*, 10, 1432. Online: <https://doi.org/10.3390/su10051432>
- Vasco, C., Tafur, V., Valdiviezo, R., Hernández, H., y Caisaguano, L. (2021). Determinantes socioeconómicos de la agrodiversidad y el monocultivo en la provincia de esmeraldas. *Ciencia y Tecnología*, 14, 37–44. Online: <https://doi.org/10.18779/cyt.v14i1.457>
- Vasco, C., Tamayo, G., y Griess, V. (2017). The drivers of market integration among indigenous peoples: Evidence from the ecuadorian amazon. *Society & Natural Resources*, 30, 1212–1228. Online: <https://doi.org/10.1080/08941920.2017.1331487>
- Vasco, C., y Tamayo, G. N. (2017). Determinants of non-farm employment and non-farm earnings in ecuador. *CEPAL Review*, 121, 53–67. Online: <https://n9.cl/kb044>
- Vasco, C., Torres, B., Jácome, E., Torres, A., Eche, D., y Velasco, C. (2021). Use of chemical fertilizers and pesticides in frontier areas: A case study in the northern ecuadorian amazon. *Land Use Policy*, 107, 105490. Online: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105490>
- Vasco, C., Torres, B., Pacheco, P., y Griess, V. (2017). The socioeconomic determinants of legal and illegal smallholder logging: Evidence from the ecuadorian amazon. *Forest Policy and Economics*, 78, 133–140. Online: <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2017.01.015>
- Vasco Pérez, C., Bilsborrow, R., y Torres, B. (2015). Income diversification of migrant colonists vs. indigenous populations: Contrasting strategies in the amazon. *Journal of Rural Studies*, 42, 1–10. Online: <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2015.09.003>
- Wikle, C. K. (2003). Hierarchical models in environmental science. *International Statistical Review*, 71, 181–199. Online: <https://www.jstor.org/stable/1403883>
- Wunder, S. (2001). Ecuador goes bananas: incremental technological change and forest loss. En A. Angelsen y D. Kaimowitz (Eds.), *Agricultural technologies and tropical deforestation*. CABI.



PROPAGACIÓN *IN VITRO* DE BANANO (*MUSA* spp.) POR EMBRIOGÉNESIS SOMÁTICA

IN VITRO PROPAGATION OF BANANA (*MUSA* spp.) BY SOMATIC EMBRYOGENESIS

Jessenia Lucero-Murillo *, Jorge Manzano-Torres , Iliana Loaiza-Maldonado
 y Yamile Orellana-García

Instituto Superior Tecnológico Ismael Pérez Pazmiño, Machala, Ecuador.

*Autor para correspondencia: jesylu_@hotmail.es

Manuscrito recibido el 5 de mayo de 2022. Aceptado, tras revisión el 23 de noviembre de 2022. Publicado el 1 de marzo de 2026.

Resumen

El banano es una fruta de gran consumo a nivel mundial por su alto valor nutritivo y es fuente de ingresos económicos para los países que se dedican a la producción de la fruta. Sin embargo, la susceptibilidad de los cultivares a plagas y enfermedades evidencia la baja producción en el cultivo. Asimismo, los altos niveles de ploidía y esterilidad dificultan el proceso de propagación de plantas. La embriogénesis somática (ES), a través de células embriogénicas, constituye una herramienta eficaz para la propagación masiva de plantas de banano por los altos coeficientes de multiplicación y bajos costos de producción. El presente artículo tiene como finalidad describir los procesos de propagación *in vitro* de plantas de banano (*Musa* spp.), mediante una revisión bibliográfica de las aplicaciones de embriogénesis somática en la micropropagación y mejoramiento genético. Para lo cual se realizó una revisión sistemática en buscadores especializados y bases de datos, a través de tres etapas: planificación, ejecución y resumen. Los resultados más relevantes indican que la ES representa una alternativa para la multiplicación de plantas, por el gran potencial para la regeneración de tejidos en un corto periodo de tiempo. Sin embargo, el riesgo de variación somaclonal ha limitado su expansión a escala comercial. Por otro lado, la ES está siendo empleada en estudios relacionados con la transformación genética de plantas. La susceptibilidad del cultivo a enfermedades como *M. fijiensis*, *F. oxysporum* f. sp. *cubense* (Foc R4T) y virus rayado del banano (BSV), ha incentivado el desarrollo de especies resistentes a través del cultivo de células embriogénicas y uso de protoplastos. De igual forma, la aplicación de técnicas de transferencia de genes o edición genética ha permitido obtener nuevas especies con resistencia o tolerancia a las principales enfermedades del cultivo.

Palabras clave: Callos, Embriogénesis somática, *In vitro*, *Musa*, Variabilidad genética.

Abstract

The banana is a fruit of great consumption worldwide due to its high nutritional value and is a source of economic income for producing countries. However, the susceptibility of cultivars to pests and diseases, and the complexity of plant regeneration due to high levels of ploidy and sterility, hinder the process of plant propagation. Somatic embryogenesis (SE), through embryogenic cells, constitutes an effective tool for the mass propagation of banana plants due to high multiplication coefficients and low production costs. The purpose of this article is to describe the processes of *in vitro* propagation of banana plants (*Musa spp.*) through a bibliographic review of the applications of somatic embryogenesis in micropropagation and genetic improvement. A systematic review was conducted in specialized search engines and databases through three stages: planning, execution, and summary. The most relevant results indicate that SE represents an alternative for plant multiplication due to its enormous potential for tissue regeneration in a short period. However, the risk of somaclonal variation has limited its expansion on a commercial scale. On the other hand, SE is being used in studies related to the genetic transformation of plants. The susceptibility of the crop to diseases such as *M. fijiensis*, *F. oxysporum* f. sp. *cubense* (Foc R4T), and banana streak virus (BSV) has encouraged the development of resistant varieties through embryogenic cell culture and the use of protoplasts. Similarly, the application of gene transfer or gene editing techniques has made it possible to obtain new varieties with resistance or tolerance to the main crop diseases.

Keywords: *Callus*, Genetic variability, *In vitro*, *Musa*, Somatic embryogenesis.

Forma sugerida de citar: Lucero-Murillo, J., Manzano-Torres, J., Loaiza-Maldonado, I. y Orellana-García, Y. (2026). Propagación *in vitro* de banano (*Musa spp.*) por embriogénesis somática. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*. Vol. 43(1):132-149. <https://doi.org/10.17163/lgr.n43.2026.07>.

Orcid IDs:

Jessenia Lucero-Murillo: <https://orcid.org/0000-0001-6723-8249>

Jorge Manzano-Torres : <https://orcid.org/0000-0002-4652-8877>

Iliana Loaiza-Maldonado: <https://orcid.org/0000-0003-2703-4887>

Yamile Orellana-García: <https://orcid.org/0000-0001-6956-8276>

1 Introducción

Las plantas de banano producen frutos muy valorados en los trópicos y subtropicos en todo el mundo (Tran y cols., 2016). El banano ocupa el segundo lugar entre los cultivos de frutales, con una producción de 115,7 millones de toneladas, y es uno de los cultivos con mayor impacto en la economía de los países exportadores (FAO, 2020). Sin embargo, los métodos de reproducción clásicos de *Musa* spp. comestibles son complejos por los niveles de ploidía y esterilidad (Simoníková y cols., 2022).

La embriogénesis somática (ES) es una herramienta para la propagación masiva de genotipos de alto rendimiento productivo (Tran y cols., 2016). Esta técnica consiste en seleccionar embriones cigóticos, meristemos proliferantes o escalpos, flores masculinas y flores femeninas (Ahmed y cols., 2014). El material seleccionado inicia un proceso de inducción de callos embriogénicos, seguido del establecimiento de suspensiones celulares embriogénicas, la formación de embriones somáticos, la maduración y germinación; luego las plantas entran al proceso de aclimatación para posteriormente salir a campo abierto (Escobedo-Gracia y cols., 2016; Taco y cols., 2026).

A pesar de la alta capacidad de regeneración de plantas, la especialidad técnica está dirigida al mejoramiento genético y no a la propagación comercial, debido al riesgo de variación somaclonal en comparación con las plantas obtenidas por el método de organogénesis (Galán y cols., 2018). Los cultivos de suspensión de células somáticas constituyen una alternativa para el mejoramiento de plantas de banano (Liu y cols., 2017). Sin embargo, el uso de protoplastos obtenidos por embriogénesis de células en suspensión (ECS) se ha utilizado con frecuencia por tener un alto rendimiento, alta actividad, fácil operación y amplia adaptabilidad (Wu y cols., 2020).

Los métodos de transformación genética actuales incluyen transformación mediada por *Agrobacterium* (Kovács y cols., 2013), bombardeo de partículas (Vishnevetsky y cols., 2011) y CRISPR/Cas9 (Wu y cols., 2020). Estos procesos han permitido

realizar mejoramientos genéticos en cultivares que son susceptibles a enfermedades (Shivani y cols., 2017), como el desarrollo de plantas resistentes al virus rayado del banano (BSV) y *Mycosphaerella fijiensis* (J. N. Tripathi y cols., 2019; Kovács y cols., 2013).

A pesar del desarrollo de plantas de banano mejoradas y la obtención de la arquitectura ideal, la respuesta inmunitaria sostenida siempre va acompañada de reducciones en el rendimiento (Wang y cols., 2021). Para ello, es necesario realizar estudios del genoma de *Musa* spp., experimentos de edición genética y el establecimiento de protocolos de cultivos *in vitro*, que permitan optimizar los procesos de transformación de plantas de banano. Por consiguiente, el presente artículo de revisión pretende describir los procesos de propagación *in vitro* de plantas de banano (*Musa* spp.), mediante una revisión bibliográfica de las aplicaciones de embriogénesis somática en la micropropagación y mejoramiento genético.

2 Metodología

La revisión sistemática se llevó a cabo a través de tres etapas (Moreno y cols., 2018): planificación, ejecución y resumen (Figura 1). La información seleccionada corresponde a artículos publicados durante los últimos 10 años, con algunas excepciones consideradas por la relevancia brindada a la revisión bibliográfica.

En la planificación, se elaboró un protocolo a seguir durante todo el proceso de revisión; para ello se empleó información como título del artículo, autores, objetivo, palabras clave, fuentes de investigación, criterios de inclusión/exclusión y tipo de estudio. Para la etapa de ejecución se obtuvo información bibliográfica de bases de datos especializadas como ResearchGate, Semantic Scholar, Google Scholar, Springer, SciELO, ScienceDirect, Frontiers y PubMed. Se realizaron búsquedas automatizadas a partir de los títulos, palabras clave y resúmenes (Figura 2). La parte del resumen comprendió la elaboración de figuras, tablas y la redacción del manuscrito.

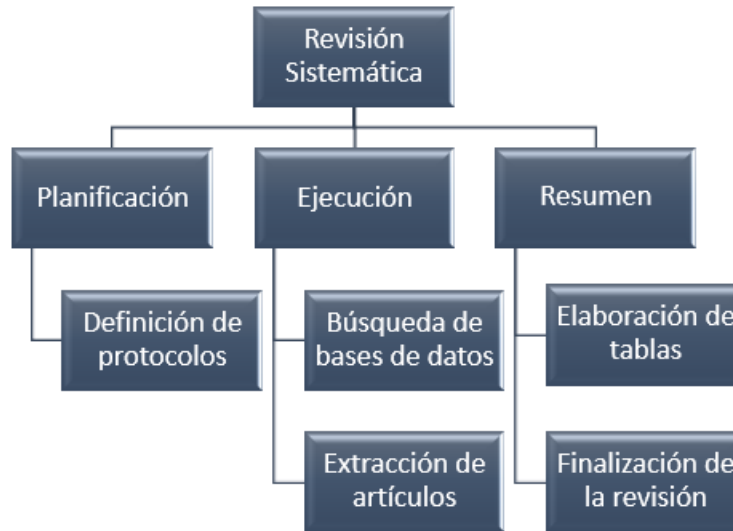


Figura 1. Proceso metodológico del fichaje crítico de artículos científicos.

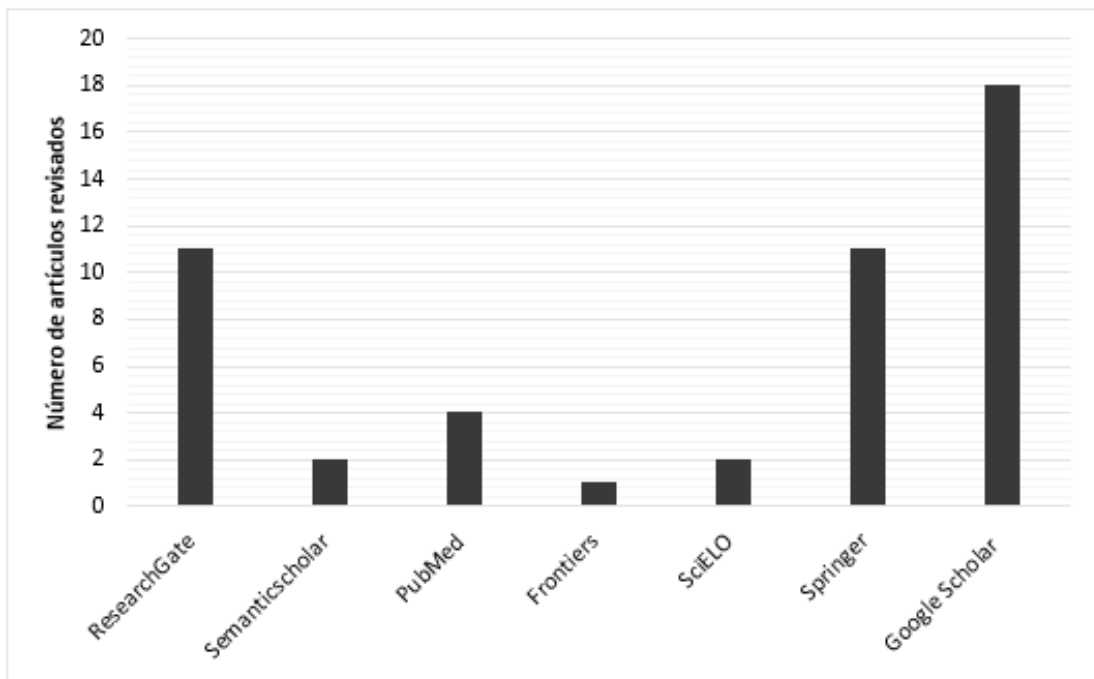


Figura 2. Revisión sistemática en buscadores especializados.

3 Cultivo *in vitro* en banano

El banano es una monocotiledónea perteneciente al género *Musa spp.*, y se encuentra entre los cultivos más importantes y distribuidos en las regio-

nes tropicales y subtropicales húmedas del mundo (Escobedo-Gracia y cols., 2016). En Ecuador, el cultivo de banano es la actividad agrícola económica de mayor relevancia (Capa Benítez y cols., 2016). Además, el país es el mayor exportador en el mun-

do, llegando a Europa, EE. UU., Asia, entre otros (MAGAP, 2016).

En la actualidad, se cultivan híbridos diploides y triploides originados de cruces naturales infraespecíficos ($2n = 2x = 22$ cromosomas), *Musa acuminata* Colla (genoma A) y *Musa balbisiana* Colla (genoma B) (Martin y cols., 2020). Sin embargo, una de las limitantes del cultivo de banano es la poliploidía y la partenocarpia vegetativa (Escobedo-Gracia y cols., 2016). La propagación vegetativa mediante brotes naturales conocidos como chupones o yemas procedentes del rizoma no logra satisfacer la demanda de genotipos élites para el establecimiento de cultivos (Lohidas y Sujin, 2015).

Con la propagación *in vitro* se sustrae un fragmento pequeño de la planta conocido como explante, para cultivarlo en condiciones asépticas con macronutrientes, micronutrientes, carbohidratos, vitaminas, reguladores de crecimiento y, en algunas ocasiones, aminoácidos; todo esto se desarrolla en ambientes controlados (Ahmed y cols., 2014). Esta técnica transita por cuatro etapas, las cuales son: establecimiento, multiplicación, enraizamiento, aclimatación y endurecimiento (Rodríguez, 2013).

En banano, la propagación *in vitro* se realiza por meristemos apicales extraídos del rizoma, dado que estos presentan un crecimiento longitudinal producto de la totipotencia celular (Ahmed y cols., 2014). Para garantizar el normal desarrollo, los meristemos deben estar establecidos en un medio de cultivo ideal, compuesto por sales inorgánicas, compuestos orgánicos, preparaciones naturales complejas y materiales de apoyo inertes (Anbazhagan y cols., 2014). El medio de cultivo más utilizado para la propagación de plantas *in vitro* de banano y plátano es el propuesto por Murashige y Skoog (MS). La composición basal de sales y minerales en la formulación MS permite al explante adaptarse a los procesos de micropropagación, aunque muchos laboratorios incorporan ciertas modificaciones basadas en los requerimientos nutricionales específicos de la planta (Galán y cols., 2018). Es necesario considerar que existen otras alternativas como el medio de cultivo de Gamborg (B5), el medio Schenk y Hildebrandt (SH) y Linsmaier y Skoog (LS) (Ngomuo y cols., 2014). Por lo tanto, el empleo de un medio de cultivo con una composición adecuada es

importante para garantizar el crecimiento y desarrollo *in vitro* de cada cultivar.

El proceso de regeneración de plantas se puede realizar por organogénesis y embriogénesis somática (Galán y cols., 2018). La primera técnica se caracteriza por la formación del primordio unipolar a partir de una yema, dando lugar al desarrollo de un brote vegetativo que guarda una relación directa con el tejido materno. Esta tecnología es simple y conocida, se puede realizar a partir de yemas, ápices o meristemos, y ha sido utilizada en procesos sistemáticos para la propagación comercial. La segunda técnica, ES, en cambio, consiste en la formación de un embrión a partir de una célula o un grupo de ellas; los embriones somáticos no poseen una conexión vascular con el tejido materno puesto que no son productos de la fusión de gametos; sin embargo, deben tener la capacidad de crecer y formar toda la estructura de la planta. Este método es considerado el más eficiente para la propagación de plantas *in vitro*, por los altos coeficientes de multiplicación en periodos cortos de tiempo y la facilidad de automatizar los procesos productivos (Morais-Lino y cols., 2016). Sin embargo, la aplicación en la propagación de bananos y plátanos es un poco limitada debido a la variación somaclonal y la escasez de estudios en campo de plantas obtenidas por estos procesos.

4 Embriogénesis somática

La ES es un proceso que consiste en la formación de un embrión a partir de una célula, sin la necesidad de la fusión de gametos (Quiala y cols., 2021). Las células pasan por ciertos procesos morfológicos y bioquímicos, obteniendo la formación de un embrión somático (Shivani y cols., 2017). Los embriones somáticos son los nuevos individuos y se caracterizan por poseer una estructura bipolar con un polo apical y radical, y tienen la capacidad de dar origen a una planta completa (Horstman y cols., 2017). La ES representa un modelo de totipotencia celular, con redes de señalización y reprogramación de patrones de expresión génica que se regulan de forma específica por acción de los reguladores de crecimiento vegetal o las condiciones ambientales (Nic-Can y Loyola-Vargas, 2016).

Se puede realizar por dos vías: directa e indirecta

(Grzyb y cols., 2018). En la ES directa, los embriones en estado de desarrollo avanzado presentan escasa uniformidad; esta técnica es muy utilizada para la regeneración de plantas. En cambio, la ES de forma indirecta produce numerosos embriones somáticos en estado temprano y presentan un desarrollo uniforme; esta técnica es utilizada para realizar suspensiones celulares (Shivani y cols., 2017). El desarrollo de los embriones somáticos en plantas monocotiledóneas pasa por tres etapas: globulares, escutelares y coleoptilares (Yuan y cols., 2016).

El proceso de producción de plantas por ES consta de cinco fases: inducción de embriones, proliferación, maduración, germinación y conservación de plantas (Bradaï y Sánchez-Romero, 2021). La inducción de embriones se inicia con la formación de masas proembriogénicas en medios de cultivos con auxinas para la formación de agregados celulares; luego se transfiere a un medio de cultivo libre de auxinas para promover la división celular y la formación de embriones. El tejido embrionario se multiplica para dar paso a la expansión de las células y acumulación de reservas; las raíces y los brotes se desarrollan en condiciones *in vitro*; y en la fase final los explantes salen al exterior para la aclimatación y desarrollo completo de la planta (Quiala y cols., 2021).

Es importante considerar que los tejidos donantes, el medio de cultivo y las condiciones de crecimiento influyen en la regeneración de plantas vía ES (Pencik y cols., 2015). Por ello, es necesario comprender los mecanismos fisiológicos y moleculares para inducir la ES (Méndez-Hernández y cols., 2019). La adición de reguladores de crecimiento en diferentes proporciones ayuda a romper la latencia y mejora la formación de los brotes (Márquez-López y cols., 2018). Las citoquininas se encargan de la formación de brotes y el crecimiento de yemas, mientras que las auxinas interfieren en la formación de raíces. La ES utiliza herramientas biotecnológicas con el potencial de realizar mejoramiento y producción masiva de plantas (Zhou y cols., 2016). Asimismo, esta técnica es utilizada en estudios de diferenciación celular, expresión génica y genética molecular (Nic-Can y Loyola-Vargas, 2016). Los cultivos en suspensión de células embriogénicas aceleran la propagación masiva del banano por su gran potencial de regeneración celular y constituyen una herramienta importante para el mejoramiento de

plantas de modo no convencional (Escobedo-Gracia y cols., 2016).

5 Inicio de la embriogénesis somática en banano

La iniciación de la ES está influenciada por el material vegetal seleccionado (Morais-Lino y cols., 2016) y el equilibrio de los reguladores de crecimiento en el medio de cultivo (Tran y cols., 2016). Uma y cols. (2021) y Morais-Lino y cols. (2016) mencionan que el material vegetal utilizado para la ES en el cultivo de banano son las inflorescencias masculinas y la recolección se debe realizar en la semana 10 después de la emergencia (Natarajan y cols., 2018) (Figura 3).

Los ápices florales inmaduros son cortados capa por capa en dos procesos (Shivani y cols., 2017). Para la eliminación de las brácteas y evitar la contaminación con agentes externos, el material se debe desinfectar con etanol al 70 % (v/v), para reducir la contaminación exógena del material vegetal (Natarajan y cols., 2018). Otro factor clave a considerar es la posición de las manos obtenidas de la inflorescencia; la selección de la sexta a la octava mano permitió obtener el $50,0 \pm 0,54\%$ de callos en *Grand Naine* y $48,0 \pm 1,67\%$ en *Rasthal*. Según Natarajan y cols. (2018), este aspecto influye en la inducción del callo embriogénico.

Los ápices florales se inoculan en un medio MS con sales, vitaminas, sacarosa al 3 % y reguladores de crecimiento exógenos de tipo auxinas, para inducir la formación de agregados celulares (Shivani y cols., 2017). Morais-Lino y cols. (2016) informan que las concentraciones de reguladores de crecimiento de 1 mg/L IAA + 4 mg/L 2,4-D + 1 mg/L NAA suplementado con glutamina inducen la formación de callos en un 50 % (Uma y cols., 2021). En cambio, Youssef y cols. (2010) comunican que el medio MS compuesto por sales y vitaminas suplementadas con $5,71 \mu\text{M}$ IAA, $18 \mu\text{M}$ de 2,4-D, $5,4 \mu\text{M}$ NAA, $4,1 \mu\text{M}$ biotina y 87mM sacarosa permiten obtener un 81 % de callos formados en explantes de yemas *Williams* y el 52,11 % en explantes de yemas *Grand Naine*. Por lo tanto, los reguladores de crecimiento permiten la formación de callos embriogénicos, siempre que se utilicen en concentraciones óptimas de acuerdo con el tipo de cultivar y especie.

Para inducir la ES se necesita considerar los factores ambientales, por ello los medios de cultivo con el material vegetal deben incubarse a 27°C en condiciones de oscuridad por un tiempo de 12 días (Shivani y cols., 2017) (Tabla 1).

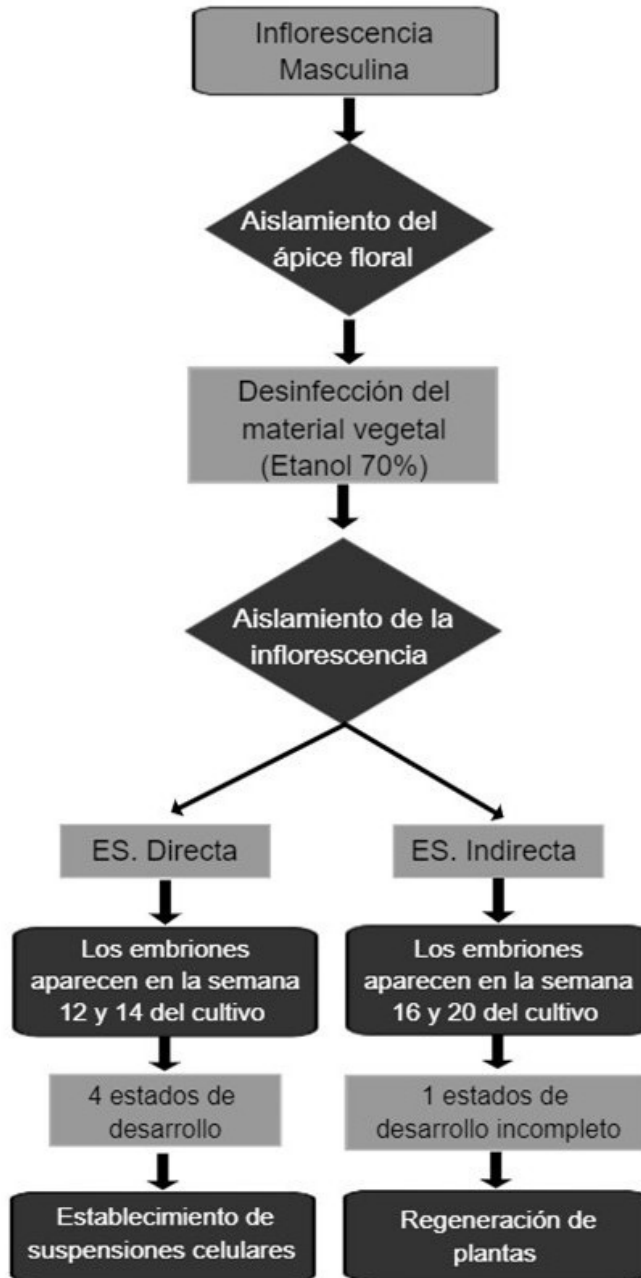


Figura 3. Proceso de inducción de embriogénesis somática en banano.

Tabla 1. Composición de los medios de cultivo para iniciar la ES indirecta en *Musa spp.*

Componentes	Flores masculinas	Flores masculinas	Meristemos	Flores masculinas	Flores masculinas
Macroelementos	MS	MS	MS	MS	MS
Microelementos	MS	MS	MS	MS	MS
Vitaminas	MS	MS	MS	MS	MS
Biotina	1 mg L ⁻¹	4,1 μM	-	-	-
Extracto de malta	100 mg L ⁻¹	-	-	-	-
ANA	1 mg L ⁻¹	5,4 μM	-	1 mg L ⁻¹	1 mg L ⁻¹
AIA	1 mg L ⁻¹	5,71 μM	-	1 mg L ⁻¹	1 mg L ⁻¹
2,4-D	4 mg L ⁻¹	18 μM	-	4 mg L ⁻¹	4 mg L ⁻¹
Picloram	-	-	-	-	-
6-BA	-	-	13,31 μM	-	-
L-Glutamina	100 mg L ⁻¹	-	-	-	50 mg L ⁻¹
Sacarosa	30 g L ⁻¹	87 mM	30 g L ⁻¹	3 %	3 %
Phytigel	2,6 g L ⁻¹	-	-	-	-
Agar	-	-	7 g L ⁻¹	0,70 %	0,70 %
Gelrite	-	2 g L ⁻¹	-	-	-
pH	5,8	5,7	5,7	5,8	5,8
Referencias	(S. Khalil y cols., 2002)	(Youssef y cols., 2010)	(Remakanthan y cols., 2014)	(Morais-Lino y cols., 2016)	(Morais-Lino y cols., 2016)

6 Proliferación e iniciación del callo embriogénico de cultivos en suspensión celular

Después del periodo de incubación (4–6 meses) se inicia la aparición de diferentes tipos de callos, los cuales son evaluados de forma mensual durante los tres primeros meses, seguido de evaluaciones periódicas cada 15 días. Después de los cuatro meses de cultivo se desarrolla el callo embriogénico de naturaleza friable formado por masas proembriogénicas de color blanco-translúcido, y por las características que presenta, el callo es considerado ideal para el establecimiento de suspensiones celulares (Morais-Lino y cols., 2016).

Una vez identificados los callos ideales, se procede al establecimiento de suspensiones celulares embriogénicas. Según Shivani y cols. (2017), los callos embriogénicos de 24 semanas se cultivan en un medio MS suplementado con 2,4-D, incubación a 27°C en oscuridad, con agitación constante a 90 rpm y subcultivos cada 7 días.

En cambio, Strosse y cols. (2003) mencionan que los callos deben transferirse a un medio líquido MS suplementado con 1 mg/L de IAA, 1, 1 mg/L de 2,4-

D y 250 μg/L de zeatina; con pH ajustado a 5,8 para la multiplicación de las células embriogénicas.

Por otro lado, Morais-Lino y cols. (2016) exponen que las masas embriogénicas se trasladan a un medio líquido MS suplementado con 1 mg/L de 2,4-D, 100 mg/L de glutamina, 1 mg/L de biotina, 10 mg/L de ácido ascórbico y 44,5 g/L de sacarosa, en condiciones de oscuridad a 27 ± 2°C, agitación constante a 120 rpm y subcultivos cada 10 días. En cada subcultivo, las suspensiones se filtran a través de un tamiz con la finalidad de eliminar células contaminadas o células que no cumplen con las características para el establecimiento de las suspensiones celulares embriogénicas (SCE) (Morais-Lino y cols., 2016).

Uno de los problemas principales en la inducción de callos es la exudación de compuestos fenólicos en el medio de cultivo, propios de la naturaleza de las musáceas, y que inducen el oscurecimiento, descomposición e hiperhidricidad de los callos. Una alternativa eficaz para disminuir los niveles de fenolización es el empleo de antioxidantes como la melatonina (50 mg/L) y L-glutamina (100 mg/L) en el medio de inducción de callos (Natarajan y cols., 2018).

El análisis de la expresión de genes de callos embriogénicos con aplicación de ácido 2,4-diclorofenoxiacético indicó que el regulador de crecimiento actúa como un inductor de la expresión

de genes (*MaBBM1*, *MaBBM2*, *MaWUS2* y *MaVP1*) (Shivani y cols., 2017). Esta expresión puede ser clave para la regeneración de plantas de banano.

Tabla 2. Composición de los medios de cultivo para la inducción y proliferación de callos embriogénicos.

Componentes	cv. Dwarf Brazilian	M.a. cv. Grand Colla (AAA)	M.a. cv. Grand Naine (AAA)	M.a. cv. Grand Naine (AAA)
Macroelementos	MS	MS 1/2	MS	MS
Microelementos	MS	MS 1/2	MS	MS
Biotina (μM)	1 mg L ⁻¹	-	-	-
Extracto de malta	100 mg L ⁻¹	-	-	-
ANA	1 mg L ⁻¹	-	-	-
AIA	1 mg L ⁻¹	-	-	-
2,4-D	4 mg L ⁻¹	4.5 μM	-	0.90 μM
Picloram	-	-	4.14 μM	-
6-BA	-	-	0.22 μM	-
L-Glutamina	100 mg L ⁻¹	-	-	-
Sacarosa	30 g L ⁻¹	174 mM	30 g L ⁻¹	30 g L ⁻¹
Caseína	200 mg L ⁻¹	-	-	-
Prolina	2 mg L ⁻¹	-	-	-
Gelrite	-	2 g L ⁻¹	-	-
Agar	-	-	7 g L ⁻¹	7 g L ⁻¹
KH ₂ PO ₄	-	200 mg L ⁻¹	-	-
pH	5.8	5.8	5.7	5.7
Referencias	(S. Khalil y cols., 2002)	(Youssef y cols., 2010)	(Remakanthan y cols., 2014)	(Remakanthan y cols., 2014)

Tabla 3. Comparación de la composición de medios de cultivo utilizados para el inicio y mantenimiento de la suspensión de células embriogénicas.

Componentes	M.a. cv. Grand Naine (AAA)	M.a. cv. Grand Colla (AAA)	M. a. Colla (AA) ssp. Malaccensis	M.a. cv. Grand Naine (AAAAB) Tropical
Macroelementos	MS	MS	MS	MS
Microelementos	MS	MS	MS	MS
Vitaminas	MS	MS	MS	MS
Biotina	4,1 μM	-	4,1 μM	1 mg L ⁻¹
2,4-D	4,5 μM	-	4,5 μM	1 mg L ⁻¹
Picloran	-	-	2,1 μM	-
L-Glutamina	684 μM	-	684 μM	100 mg L ⁻¹
Extracto de malta	100 mg L ⁻¹	-	100 mg L ⁻¹	1 mg L ⁻¹
Sacarosa	131 mM	87 mM	87 mM	44.5 g L ⁻¹
Agar	-	-	-	-
pH	5,3	5,8	5,3	5,8
Referencias	(Grapin y cols., 2000)	(Youssef y cols., 2010)	(Escobedo-Gracia y cols., 2016)	(Morais-Lino y cols., 2016)

7 Desarrollo y maduración del embrión somático

Una vez formado el callo embriogénico (3–5 meses) en un medio de cultivo específico (Escobedo-Gracia y cols., 2016), el siguiente paso es la proliferación del tejido embriogénico, el cual se lleva a cabo en

un medio MS con sales y vitaminas, suplementado con 87 mM de sacarosa, 4,52 μM de 2,4-D, 4,1 μM de biotina, 680 μM de glutamina, 100 mg/L de extracto de malta, pH ajustado a 5,3 y agitación constante a 90 rpm a 27 °C en oscuridad. El medio debe ser renovado de forma semanal y las suspensiones celulares deben ajustarse a un volumen determinado (Enríquez, 2019).

Tabla 4. Comparación de la composición de medios de cultivo utilizados para el desarrollo y maduración de embriones somáticos de *Musa spp.*

Componentes	cv. Dwarf Brazilian (AAB)	<i>M. a. ssp. Malaccensis</i> (AA)	cv. Grand Naine (AAA)	<i>M.a. cv. Grand Naine</i> (AAA)
Macroelementos	MS	MS	MS	MS
Microelementos	MS	MS	MS	MS
Vitaminas	MS	MW	MS	MS
KH ₂ PO ₄ (mM)	–	1.47 mM	–	–
Biotina	4.1 μM	–	–	–
Sacarosa	131 mM	87.6 mM	30 g L ⁻¹	30 g L ⁻¹
BAP	–	–	2.2 μM	0.8 mg L ⁻¹
ANA	5.4 μM	–	2.68 μM	–
Kinetina	2.3 μM	–	–	–
Zeatina	0.9 μM	–	–	–
Extracto de malta	100 mg L ⁻¹	–	–	–
Glutamina	680 μM	–	–	–
Picloran	–	–	–	–
AIA	–	–	–	0.7 mg L ⁻¹
Agar	–	–	–	7 g L ⁻¹
Phytigel	2.6 g L ⁻¹	–	4 g L ⁻¹	–
Gelrite	–	2 g L ⁻¹	–	–
pH	5.8	5.8	5.7	5.8
Referencias	(S. M. Khalil y Elbanna, 2004)	(Escobedo-Gracia y cols., 2016)	(Remakanthan y cols., 2014)	(Morais-Lino y cols., 2016)

Para determinar el crecimiento de la ES y definir los tiempos correctos de subcultivo, es necesario establecer la curva de crecimiento de la suspensión celular. Para ello, se toma 1,5 ml de células somáticas, se determina la concentración de células inicial y se coloca en 50 ml del medio líquido MS. El crecimiento se calcula por el cambio en el volumen celular

para el intervalo de evaluación cada 5 días durante 40 días. Asimismo, la calidad de suspensiones celulares embriogénicas se determina mediante la evaluación de la constitución celular (tipos celulares), la coloración, la tasa de multiplicación y el poder de regeneración (Morais-Lino y cols., 2016).

Tabla 5. Composición media comúnmente utilizada para la germinación de embriones somáticos en *Musa* spp.

Componentes	cv. Grand Naine (AAA)	M.a. cv. Grand Colla (AAA)	M.a. cv. Grand Naine (AAA)	M.a. cv. Grand Naine (AAA)	Tropical (AAAAB)
Macroelementos	MS	MS	MS	MS	MS
Microelementos	MS	MS	MS	MS	MS
Vitaminas	MS	MS	MS	MS	MS
KH ₂ PO ₄ (mM)	1,47 mM	–	–	–	–
Sacarosa	–	87 mM	–	30 g L ⁻¹	30 g L ⁻¹
BAP	–	0,22 μM	0,22 μM	0,8 mg L ⁻¹	0,2 mg L ⁻¹
Picloran	–	–	4,14 μM	–	–
AIA	1,14 μM	1,14 μM	–	0,7 mg L ⁻¹	0,1 mg L ⁻¹
Agar	–	–	–	7 g L ⁻¹	7 g L ⁻¹
Gelrite	–	2 g L ⁻¹	–	–	–
pH	–	5,8	–	–	–
Número de embriones	–	–	355,83±31,72	6076,6	106,0
% Germinación	35–46	35	100	–	–
% Conversión	–	–	–	20,21	79,72
Referencias	(S. M. Khalil y Elbanna, 2004)	(Youssef y cols., 2010)	(Remakanthan y cols., 2014)	(Morais-Lino y cols., 2016)	(Morais-Lino y cols., 2016)

8 Plantas derivadas de ES

La obtención de plantas a partir de la germinación de ES con raíces y brotes normales se logra en los sustratos que contengan reguladores de crecimiento (Escobedo-Gracia y cols., 2014). El desarrollo va a depender del genotipo y del procedimiento ejecutado previo y durante el desarrollo del embrión (Morais-Lino y cols., 2016). Después del proceso de aclimatación y endurecimiento, se pueden estimar tasas de conversión que son comparables con los porcentajes de germinación embrionaria.

Estos porcentajes, según el genotipo, fluctúan entre el 3 y el 46% en bananos triploides Cavendish (AAA), pero cuando los embriones somáticos se obtienen de cultivos de suspensión de células embriogénicas, los valores pueden llegar hasta el 91% de germinación (Domergue y cols., 2000). La tasa más alta fue encontrada en triploides (AAB) cv. *Brasileño Enano* y *Musa acuminata* cv. *Grand Naine* (AAA); además, tienen en común que el desarrollo del embrión pasa por una fase de diferenciación-maduración (Remakanthan y cols., 2014).

Los embriones obtenidos por ES de las puntas de los brotes, como es el caso de *Musa acuminata* AAA, cv. *Grand Naine*, presentan de un 2 a 3%

de conversión de embriones (Remakanthan y cols., 2014). Algunos protocolos de ES que han sido descritos para varios genotipos de banano presentan porcentajes de germinación de embriones somáticos y tasas de conversión de embriones diferentes, debido a que los datos presentados no siempre hacen una distinción entre ambas situaciones (Escobedo-Gracia y cols., 2016).

Las tasas de conversión varían desde un 13% en los comestibles (AA), un 13 a un 25% para *Grand Naine* del subgrupo Cavendish (AAA), un 66,7% en el plátano africano *Highland* (AAA) (Namanya y cols., 2004) y un 100% en la especie silvestre *Musa acuminata* ssp. (AA) (Escobedo-Gracia y cols., 2016).

En lo que compete al mejoramiento no convencional (transformación genética) para contrarrestar los problemas de plagas y obtener una mayor tasa de germinación, la ES es un proceso esencial en sistemas de regeneración *in vitro*, lo que permite el desarrollo de variedades resistentes (Ghag y cols., 2014); por esa razón, es importante continuar con el desarrollo y optimización de los protocolos de ES de los diferentes clones cultivados (Escobedo-Gracia y cols., 2016).

Tabla 6. Empresas biotecnológicas con certificado fitosanitario para importar plantas *in vitro* de banano (*Musa sapientum*) en Ecuador.

Empresas	País de procedencia	Certificado Fitosanitario Plantas libres de:
Agribiotecnología Cristal Vitro	Costa Rica	Banana bunchy top virus (BBTV) Banana streak badnavirus (BSV) Banana bract mosaic potyvirus (BBMV) Banana bract mosaic virus (BBrMV) Abaca mosaic virus (ABTV) Abaca mosaic virus (AbaMV) Banana mild mosaic virus (BanMMV) Banana virus X (BVX) <i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>ubense</i> raza tropical 4
Genética Salvadoreña S.A.	El Salvador	Cucumber mosaic virus (CMV) Abaca mosaic virus (ABTV) Banana bunchy top virus (BBTV) Banana streak badnavirus (BSV) Banana bract mosaic virus (BBMV) Banana mild mosaic virus (BanMMV) Banana virus X (BVX) y <i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>ubense</i> raza tropical 4
Galiltec S.A.	Honduras	Banana streak virus (BSV) Banana bunchy top virus (BBTV) Banana bract mosaic potyvirus (BBMV) Banana bract mosaic virus (BBrMV) Abaca mosaic virus (ABTV) Abaca mosaic virus (AbaMV) Banana mild mosaic virus (BanMMV) Banana virus X (BVX) <i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>ubense</i> raza tropical 4
Rahan Meristem del Ecuador Cía. Ltda	Israel	Banana bunchy top virus (BBTV), Cucumber mosaic virus (CMV) Banana streak badnavirus (BSV), Banana bract mosaic virus (BBrMV) Abaca bunchy top virus (ABTV) Abaca mosaic virus (AbaMV) Banana mild mosaic virus (BanMMV) Banana virus X (BVX) <i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>ubense</i> Raza 4 Tropical
Nature Source Improves Plants de México, S.A.	México	Banana bunchy top virus (BBTV) Banana streak badnavirus (BSV) Banana bract mosaic potyvirus (BBMV) Banana bract mosaic virus (BBrMV) Abaca mosaic virus (ABTV) Abaca mosaic virus (AbaMV) Banana mild mosaic virus (BanMMV) Banana virus X (BVX) <i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>ubense</i> raza tropical 4
Du Roi	Sudáfrica	Banana bunchy top virus (BBTV) Banana rayado badnavirus (BSV) Banana bract mosaic potyvirus (BBMV) Banana bract mosaic virus (BBrMV) Abaca mosaic virus (ABTV) Abaca mosaic virus (AbaMV) Banana mild mosaic virus (BanMMV) <i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>ubense</i> Raza 4 Tropical

Fuente: Agrocaldad, (2022)

Tabla 7. Establecimientos registrados para la propagación de material vegetal *in vitro* de banano (*Musa sapientum*).

Razón Social	Cantón	Estado	Tipo Operación	Tipo/Área
BIOFABRICA MONTUBIA S.A.S.	Machala	Registrado	Micropropagador meristemático	Laboratorio de Micropropagación
SEBIOCA C.A. EN LIQUIDACIÓN	Guayaquil	Registrado	Micropropagador meristemático	Laboratorio de Micropropagación
RAHAN MERISTEM DEL ECUADOR CIA. LTDA.	Guayaquil	Registrado	Micropropagador meristemático	Laboratorio de Micropropagación
VITROLIFE S.A.	Guayaquil	Registrado	Micropropagador meristemático	Laboratorio de Micropropagación
ONE VITRO S.A.	Durán	Registrado	Micropropagador meristemático	Laboratorio de Micropropagación
BIOGENETICAGREEN C.A.	Quito	Registrado	Micropropagador meristemático	Laboratorio de Micropropagación
GERMOPLANTA CIA. LTDA.	Rumiñahui	Registrado	Micropropagador meristemático	Laboratorio de Micropropagación
ORANGELAB S.A.	Quito	Registrado	Micropropagador meristemático	Laboratorio de Micropropagación
YURA BUSINESS S.A.S.	Quito	Registrado	Micropropagador meristemático	Laboratorio de Micropropagación

Fuente: Agrocalidad, (2022)

9 Variación somaclonal en ES de plantas regeneradas

Una particularidad en los cultivos *in vitro* de tejidos vegetales es la aparición de la variación somaclonal, existiendo cambios genéticos en las células y en tejidos cultivados (Nwauzoma y Jaja, 2013). En algunas ocasiones, esta variación es empleada para el mejoramiento genético, permitiendo ampliar la variación genética natural (Wang y cols., 2021); pero cuando se desea realizar una propagación clonal, la variación somaclonal resulta una anomalía no deseada.

El entorno del cultivo *in vitro*, como son el tipo y la concentración de hormonas reguladoras del crecimiento en plantas, más los antecedentes genéticos del explante, el número total y la duración de los subcultivos, pueden alterar las características que presentan las plantas regeneradas por embriones somáticos (?). Todos estos factores contribuyen a la generación de variación genética y epigenética (Escobedo-Gracia y cols., 2016), que es expresada en el fenotipo y se conoce como variación somaclonal (Youssef y cols., 2010). Esta puede constituir una variación genética preexistente en el explante,

debido a cambios en el número de cromosomas, o ser inducida mediante el cultivo *in vitro*; además, en el ADN también pueden ocurrir mutaciones y cambios epigenéticos a nivel secuencial (Wang y cols., 2021).

También se conoce que la variación somaclonal en el cultivo de banano está asociada con cultivos a largo plazo, cultivos que involucran una fase de callo o altas tasas de tratamientos de multiplicación (Nwauzoma y Jaja, 2013). Por otro lado, la disminución en la capacidad de regeneración de los cultivos provenientes de la suspensión de células embriogénicas se asocia con la inestabilidad citogenética en bananos triploides Cavendish (genoma AAA), regenerados a partir de cultivos en suspensión celular a largo plazo y la subsiguiente pérdida del potencial de regeneración (Wu y cols., 2020).

El proceso de regeneración por ES mostró estabilidad genética en comparación con las plántulas regeneradas de cultivos de largo plazo, donde se encontró una mayor cantidad de ADN (Escobedo-Gracia y cols., 2016). En lo que respecta a la inestabilidad o estabilidad genética, al evaluar los parámetros morfológicos y agronómicos, la variación

es de alrededor de 0,3 a 3,6 %; por otra parte, los marcadores moleculares registraron una variación baja, de 1,4 a 1,6 %, dentro de la variación natural encontrada en la planta madre utilizada como fuente de explante (Ghag y cols., 2014).

Tabla 8. Variación somaclonal en plantas de banano regeneradas por embriogénesis somática *in vitro*.

Materiales vegetales (Composición genómica)	Tejido/Fuente de variación	Método de detección	Porcentaje de variación (%)	Referencias
<i>M. a.</i> (AAA) cv. Grand Naine	Cultivo embriogénico	AFLP	1.4	Youssef y cols. (2010)
<i>M. a.</i> (AAA) cv. Williams	Cultivo embriogénico	AFLP	1.6	Youssef y cols. (2010)
Grand Naine (AAA)	Suspensiones celulares	Cebadores SSR	0	Morais-Lino y cols. (2016)
Tropical (AAAB)	Suspensiones celulares	Cebadores SSR	0	Morais-Lino y cols. (2016)
cv. Valery (AAA)	Cultivo embriogénico	Conteo de cromosomas	30 % de aneuploidía	Moradi y cols. (2017)

Tabla 9. Resultados del mejoramiento genético de banano a través de procesos de generación de plantas *in vitro*.

Cultivar	Tejido/Origen	Gen expresado/ Gen diana	Técnica de transferencia	Rasgo modificado	Planta transgénica	Referencias
Grand Nain (AAA)	ECS (Flores masculinas)	Gen de la endoquitinasa <i>ThEn-42</i> de <i>Trichoderma</i> con gen de la estilbeno sintasa de uva (StSy) y gen superóxido dismutasa (Cu, Zn-SOD) de tomate	Biobalística	Resistencia a <i>M. fijiensis</i>	Sí	Vishnevetsky y cols. (2011)
Gros Michel (AAA)	ECS (Flores masculinas)	Genes de quitinasa de arroz	<i>Agrobacterium</i>	Resistencia a <i>M. fijiensis</i>	Sí	Kovács y cols. (2013)
<i>Musa acuminata</i> L. AA, cv. Mas	Flores masculinas (Organogénesis directa)	GUS	Biobalística + <i>Agrobacterium</i>	–	Sí	Liu y cols. (2017)
Cavendish “Williams”	ECS (Flores masculinas)	ARNg	CRISPR/ Cas9	Resistencia a enfermedades	Sí	Naim y cols. (2018)
“Gonja manjaya” (AAB)	Plantas <i>in vitro</i>	gRNA1 (ORF1), gRNA2 (ORF2), gRNA3 (ORF3)	CRISPR/ Cas9	Resistencia al virus rayado del banano (BSV)	Sí	J. N. Tripathi y cols. (2019)
Cavendish (AAA)	Protoplastos	sgRNA	CRISPR/ Cas9	Resistencia a enfermedades	Sí	Wu y cols. (2020)

Nota: ECS = Embriogénesis de células en suspensión.

10 Transformación genética del banano utilizando cultivos de ES

El desarrollo de variedades mejoradas de banano a través de métodos convencionales representa un desafío debido a la baja variabilidad genética, la poliploidía y la esterilidad de los cultivos comerciales (L. Tripathi y cols., 2019). Por tanto, la técnica de embriogénesis somática constituye una alternativa para el mejoramiento de plantas de banano (Liu y cols., 2017).

De igual forma, el uso de protoplastos obtenidos por embriogénesis de células en suspensión (ECS) se utiliza debido a su alto rendimiento, alta actividad, fácil operación y amplia adaptabilidad (Wu y cols., 2020). Los métodos de transformación genética utilizados en el banano incluyen la transformación mediada por *Agrobacterium* (Kovács y cols., 2013), bombardeo de partículas (Vishnevetsky y cols., 2011) y CRISPR/Cas9 (Wu y cols., 2020).

Las tecnologías de edición del genoma son valiosas para explorar los mecanismos subyacentes de la función y la regulación de los genes, y pueden servir como plataforma para la mejora genética de los cultivos mediante la eliminación del ADN cromosómico indeseable, la regulación positiva o negativa de los genes endógenos y la introducción de secuencias de codificación novedosas (Liu y cols., 2017). En la Tabla 9 se describen los principales resultados obtenidos en la regeneración de plantas de banano.

11 Conclusiones

La propagación de banano por embriogénesis somática representa una alternativa para la multiplicación de plantas, por el gran potencial para la regeneración de tejidos en un corto periodo de tiempo. Sin embargo, el riesgo de variación somaclonal que pueden presentar los explantes ha limitado su expansión a escala comercial. Por ello, es necesario desarrollar protocolos específicos para cada especie, seleccionar el material vegetal adecuado e identificar el tipo de genotipo, para garantizar el éxito de la micropropagación de plantas.

Por otro lado, la variabilidad genética que pre-

sentan los explantes sometidos a esta técnica ha sido utilizada para estudios relacionados con la transformación genética de plantas de banano. La susceptibilidad del cultivo a enfermedades como *M. fijiensis*, *F. oxysporum* f. sp. *cubense* (Foc R4T) y virus rayado del banano (BSV), ha incentivado el desarrollo de nuevos protocolos de establecimiento *in vitro* de especies resistentes.

La propagación a gran escala de plantas a partir de embriogénesis es una alternativa efectiva para los monocultivos de banano en cada renovación, por lo que la trazabilidad en el proceso se hace necesaria para identificar mutaciones. La aplicación de células embriogénicas en suspensión o el uso de protoplastos de forma conjunta con las técnicas de transferencia de genes o edición genética han permitido obtener nuevas especies con resistencia o tolerancia a las principales enfermedades del cultivo.

Contribución de los autores

J.R.L.M.: Conceptualización, curación de datos, análisis formal, adquisición de financiación, investigación, metodología, software, validación, escritura – borrador original, escritura – revisión y edición. **J.W.M.T.:** Adquisición de financiación, supervisión. **I.C.L.M.:** Validación, administración de proyecto. **Y.A.O.G.:** Recursos, visualización.

Referencias

- Ahmed, S., Sharma, A., Singh, A. K., Wali, V. K., y Kumari, P. (2014). In vitro multiplication of banana (*Musa* sp.) cv. Grand Naine. *African Journal of Biotechnology*, 13(27). Online: <https://doi.org/10.5897/AJB2014.13750>
- Anbazzhagan, M., Balachandran, B., y Arumugam, K. (2014). In vitro propagation of *Musa* sp. (banana). *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 3(7), 399–404. Online: <https://tinyurl.com/23lh8gk9>
- Bradai, F., y Sánchez-Romero, C. (2021). Effect of Cryopreservation on the Ex-Vitro Establishment of Olive Plants Regenerated via Somatic Embryogenesis. *Plants*, 10(2), 2223–7747. Online: <https://doi.org/10.3390/plants10020396>

- Capa Benítez, L. B., Alaña Castillo, T. P., y Benítez Narváez, R. M. (2016). Importancia de la producción de banano orgánico: Caso provincia El Oro, Ecuador. *Revista Universidad y Sociedad*, 8(3), 64–71. Online: <https://tinyurl.com/24w794kz>
- Domergue, F. G. R., Ferrière, N., y Côte, F. X. (2000). Morphohistological study of the different constituents of a banana (*Musa* AAA, cv. Grande naine) embryogenic cell suspension. *Plant Cell Reports*, 19, 748–754. Online: <https://doi.org/10.1007/s002999900188>
- Enríquez, A. (2019). *Análisis fisiológico, bioquímico y molecular del desarrollo y maduración del embrión somático* (Tesis Doctoral, Tesis doctoral). Online: <https://tinyurl.com/yxoqejyq>
- Escobedo-Gracia, R. M., Enríquez-Valencia, A. J., Youssef, M., López-Gómez, P., Cruz-Cárdenas, C. I., y Ku-Cauich, J. R. (2016). Somatic Embryogenesis in Banana, *Musa* ssp. En V. Loyola-Vargas y N. Ochoa-Alejo (Eds.), *Somatic Embryogenesis: Fundamental Aspects and Applications*. Cham: Springer. Online: https://doi.org/10.1007/978-3-319-33705-0_21
- Escobedo-Gracia, R. M., Maldonado-Borges, J. I., Burgos-Tan, M. J., Valadez-González, N., y Ku-Cauich, J. R. (2014). Using flow cytometry and cytological analyses to assess the genetic stability of somatic embryo-derived plantlets from embryogenic *Musa acuminata* Colla (AA) ssp. *malaccensis* cell suspension cultures. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*, 116, 175–185. Online: <https://doi.org/10.1007/s11240-013-0394-z>
- FAO. (2020). *Examen del mercado del banano: resultados preliminares de 2019* (Inf. Téc.). Roma: Food and Agriculture Organization.
- Galán, V., Rangel, A., López, J., Hernández, J. B. P., Sandoval, J., y Rocha, H. S. (2018). Propagación del banano: técnicas tradicionales, nuevas tecnologías e innovaciones. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 40(4). Online: <https://doi.org/10.1590/0100-29452018574>
- Ghag, S., Shekhawat, U. S., y Ganapathi, T. (2014). Transgenic banana plants expressing a *Stellaria media* defensin gene (Sm-AMP-D1) demonstrate improved resistance to *Fusarium oxysporum*. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*, 119, 247–255. Online: <https://doi.org/10.1007/s11240-014-0529-x>
- Grapin, A., Ortiz, J. L., Domergue, R., Babeau, J., Monmarson, S., Escalant, J. V., ... Côte, F. (2000). Establishment of embryogenic callus and initiation and regeneration of embryogenic cell suspensions from female and male immature flowers of *Musa*. *Musalit*, 7(1), 13–15. Online: <https://www.musalit.org/seeMore.php?id=13956>
- Grzyb, M., Kalandyk, A., y Mikula, A. (2018). Efecto de TIBA, fluridona y ácido salicílico sobre la embriogénesis somática y el contenido de hormonas y azúcares endógenos en el helecho arborescente *Cyathea delgadii* Sternb. *Acta Physiologiae Plantarum*, 40, 1. Online: <https://doi.org/10.1007/s11738-017-2577-4>
- Horstman, A., Bemer, M., y Boutilier, K. (2017). Una visión transcripcional de la embriogénesis somática. *Regeneración*, 4(4), 201–216. Online: <https://doi.org/10.1002/reg2.91>
- Khalil, S., Cheah, K., Perez, E., Gaskill, D., y Hu, J. (2002). Regeneration of banana (*Musa* spp. AAB cv. Dwarf Brazilian) via secondary somatic embryogenesis. *Plant Cell Reports*, 20(12), 1128–1134. Online: <https://doi.org/10.1007/s00299-002-0461-0>
- Khalil, S. M., y Elbanna, A. A. M. (2004). Highly efficient somatic embryogenesis and plant regeneration via suspension cultures of banana (*Musa* spp.). *Arab Journal of Biotechnology*, 7, 99–110.
- Kovács, G., Sági, L., y Jacon, G. (2013). Expression of a rice chitinase gene in transgenic banana ('Gros Michel', AAA genome group) confers resistance to black leaf streak disease. *Transgenic Research*, 22, 117–130. Online: <https://doi.org/10.1007/s11248-012-9631-1>
- Liu, J., Gao, P., Sun, X., Zhang, J., Sun, P., Wang, J., ... Jin, Z. (2017). Efficient regeneration and genetic transformation platform applicable to five *Musa* varieties. *Electronic Journal of Biotechnology*, 25, 33–38. Online: <https://doi.org/10.1016/j.ejbt.2016.11.002>
- Lohidas, J., y Sujin, D. (2015). Effect of growth hormones in the micro propagation of Banana cv. Matti. *Plant Archives*, 15(1), 307–314. Online: <https://tinyurl.com/29hd3t9e>

- MAGAP. (2016). *Análisis Sectorial BANANA* (Inf. Téc.). Quito: Pro Ecuador. Online: <https://tinyurl.com/y6ywd4pt>
- Martin, G., Cardi, C., Sarah, G., Ricci, S., Jenny, C., Fondi, E., ... Yahiaoui, N. (2020). Genome ancestry mosaics reveal multiple and cryptic contributors to cultivated banana. *The Plant Journal*, 102(5), 1008–1025. Online: <https://doi.org/10.1111/tpj.1468>
- Moradi, Z., Farahani, F., Sheidai, M., y Nejad Sattari, T. (2017). Somaclonal variation in banana (*Musa acuminata* colla cv. Valery) regenerated plantlets from somatic embryogenesis: histological and cytogenetic approaches. *Caryologia*, 70(1), 1–6. Online: <https://doi.org/10.1080/00087114.2016.1198665>
- Morais-Lino, L. S., Santos-Serejo, J. A., Amorim, E. P., de Santana, J. R. F., Pasqual, M., y de Oliveira e Silva, S. (2016). Somatic embryogenesis, cell suspension, and genetic stability of banana cultivars. *In Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant*, 52(1), 99–106. Online: <https://doi.org/10.1007/s11627-015-9729-2>
- Moreno, B., Muñoz, M., Cuellar, J., Domancic, S., y Villanueva, J. (2018). Revisiones sistemáticas: definición y nociones básicas. *Revista clínica de periodoncia, implantología y rehabilitación oral*, 11(3), 184–186.
- Márquez-López, R. E., Pérez-Hernández, C., Kugonzález, , Galaz-Ávalos, R. M., y Loyola-Vargas, V. M. (2018). Localization and transport of indole-3-acetic acid during somatic embryogenesis in *Coffea canephora*. *Protoplasma*, 255(2), 695–708. Online: <https://tinyurl.com/y2ugj6mf>
- Méndez-Hernández, H., Ledezma-Rodríguez, M., Avilez-Montalvo, R., Juárez-Gómez, Y., Skeete, A., Avilez-Montalvo, J., ... Loyola-Vargas, V. (2019). Signaling overview of plant somatic embryogenesis. *Frontiers in Plant Science*, 10, 77. Online: <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00077>
- Naim, F., Dugdale, B., Kleidon, J., Brinin, A., Shand, K., Waterhouse, P., y Dale, J. (2018). Gene editing the phytoene desaturase alleles of Cavendish banana using CRISPR/Cas9. *Transgenic Research*, 27(5), 451–460. Online: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11248-018-0083-0>
- Namanya, P., Magambo, S. M., Mutumba, G., y Tushemereirwe, W. (2004). Somatic embryogenesis from immature male inflorescences of East African highland banana CV 'Nakyetengu'. *African Crop Science Journal*, 12(1), 43–49. Online: <https://tinyurl.com/y2bknwou>
- Natarajan, N., Krish, K., Duraijalagaraja, S., y Soorianathasundaram, K. (2018). Plant regeneration, developmental pattern and genetic fidelity of somatic embryogenesis derived *Musa* spp. *Journal of Genetic Engineering and Biotechnology*, 16(2), 587–598. Online: <https://doi.org/10.1016/j.jgeb.2018.10.001>
- Ngomuo, M., Mneney, E., y Ndakidemi, P. A. (2014). The in vitro propagation techniques for producing banana using shoot tip cultures. *American Journal of Plant Sciences*. Online: <https://doi.org/10.4236/ajps.2014.511175>
- Nic-Can, G. I., y Loyola-Vargas, V. M. (2016). El papel de las auxinas durante la embriogénesis somática. En V. M. Loyola-Vargas y N. Ochoa-Alejo (Eds.), *Embriogénesis somática. Aspectos fundamentales y aplicaciones* (pp. 171–181). Cham: Springer. Online: https://doi.org/10.1007/978-3-319-33705-0_10
- Nwauzoma, A. B., y Jaja, E. T. (2013). A review of somaclonal variation in plantain (*Musa* spp): mechanisms and applications. *Journal of Applied Biosciences*, 67, 5252–5260. Online: <https://doi.org/10.4314/jab.v67i0.95046>
- Pencik, A., Tureková, V., Paulišić, S., Rolčík, J., Strnad, M., y Mihaljevic, S. (2015). El amonio regula el potencial embriogénico en *Cucurbita pepo* a través de cambios mediados por el pH en la auxina endógena y el ácido abscísico. *Cultivo de órganos de tejido celular vegetal*, 122, 89–100. Online: <https://doi.org/10.1007/s11240-015-0752-0>
- Quiala, E., Barbón, R., Mestanza, S., La O, M., Gardenis, M., Nuñez, J., ... Noceda, C. (2021). Somatic embryogenesis and plant regeneration from leaf of the interspecific hybrid of mahogany (*Swietenia macrophylla* King × *S. mahagoni* (L.) Jacq.). *Trees*. Online: <https://doi.org/10.1007/s00468-021-02192-x>
- Remakanthan, A., Menon, T. G., y Soniya, E. V. (2014). Somatic embryogenesis in banana (*Musa acuminata* AAA cv. Grand Naine): effect of explant and culture conditions. *In Vitro Cellular &*

- Developmental Biology - Plant*, 50(1), 127–136. Online: <https://doi.org/10.1007/s11627-013-9546-4>
- Rodríguez, P. A. (2013). Cultivo de tejidos [Manual de software informático]. Bogotá, Colombia. Online: <https://tinyurl.com/y5cuv8z6> (Módulo Escuela de Ciencias Agrícolas Pecuarias y del Medio Ambiente)
- Shivani, Awasthi, P., Sharma, V., Kaur, N., Kaur, N., Pandey, P., y Tiwari, S. (2017). Genome-wide analysis of transcription factors during somatic embryogenesis in banana (*Musa spp.*) cv. Grand Naine. *PLoS ONE*, 12(8), e0182242. Online: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0182242>
- Simoníková, D., Cízková, J., Zoulová, V., Christelová, P., y Hribová, E. (2022). Advances in the Molecular Cytogenetics of Bananas, Family Musaceae. *Plants*, 11(4), 482. Online: <https://doi.org/10.3390/plants11040482>
- Strosse, H., Domergue, R., Panis, B., Escalant, J. V., y Côte, F. (2003). *Banana and plantain embryogenic cell suspensions* (Technical Guidelines 8). Montpellier, France: The International Network for the Improvement of Banana and Plantain (INIBAP).
- Taco, J., Jiménez, R., y Soto, M. (2026). Valorization of banana peel (*Musa paradisiaca*) as a raw material for biopolymer production. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*, 43(1), 158–169. Online: <https://doi.org/10.17163/lgr.n43.2026.09>
- Tran, T. H., Bui, T. V., y Feng, T. Y. (2016). The role of auxin and cytokinin on somatic embryogenesis from cell suspension cultures of the banana cultivar “Cau Man”. *Acta Horticulturae*(1114), 219–226. Online: <https://doi.org/10.17660/actahortic.2016.1114.30>
- Tripathi, J. N., Ntui, V. O., Ron, M., Muiruri, S. K., Britt, A., y Tripathi, L. (2019). CRISPR/Cas9 editing of endogenous banana streak virus in the B genome of *Musa spp.* overcomes a major challenge in banana breeding. *Communications Biology*, 2(1), 1–11. Online: <https://www.nature.com/articles/s42003-019-0288-7>
- Tripathi, L., Ntui, V. O., y Tripathi, J. N. (2019). Application of genetic modification and genome editing for developing climate-smart banana. *Food and Energy Security*, 8(4), 1–16. Online: <https://doi.org/10.1002/fes3.168>
- Uma, S., Kumaravel, M., Backiyarani, S., Sarawathi, M., Durai, P., y Karthic, R. (2021). La embriogénesis somática como herramienta para la reproducción de plantas genéticamente estables en banano y ensayos de campo confirmatorios. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*, 147, 181–188. Online: <https://doi.org/10.1007/s11240-021-02108-0>
- Vishnevetsky, J., White, T. L., Palmateer, A. J., Flaishman, M., Cohen, Y., Elad, Y., ... Perl, A. (2011). Improved tolerance toward fungal diseases in transgenic Cavendish banana (*Musa spp.* AAA group) cv. Grand Nain. *Transgenic Research*, 20(1), 61–72. Online: <https://tinyurl.com/y6sjobjed>
- Wang, X., Yu, R., y Li, J. (2021). Using genetic engineering techniques to develop banana cultivars with fusarium wilt resistance and ideal plant architecture. *Frontiers in Plant Science*, 11, 617528. Online: <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.617528>
- Wu, S., Zhu, H., Liu, J., Yang, Q., Shao, X., Bi, F., ... Yi, G. (2020). Establishment of a PEG-mediated protoplast transformation system based on DNA and CRISPR/Cas9 ribonucleoprotein complexes for banana. *BMC Plant Biology*, 20(1), 425. Online: <https://doi.org/10.1186/s12870-020-02609-8>
- Youssef, M., James, A., Mayo-Mosqueda, A., Kucay, J., Grijalva, R., Escobedo, R., y Medrano, G. (2010). Influence of genotype and age of explant source on the capacity for somatic embryogenesis of two Cavendish banana cultivars (*Musa acuminata* Colla, AAA). *African Journal of Biotechnology*, 9(15), 2216–2223. Online: <https://doi.org/10.4314/ajb.v9i15>
- Yuan, G., Shui-Gen, L., Xiao-Fen, F., y Zhen-Hong, S. (2016). Application of Somatic Embryogenesis in Woody Plants. *Frontiers in Plant Science*, 7, 938. Online: <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00938>
- Zhou, Q., Wang, M., Yuan, Y., Wang, X., Fu, R., Wan, H., ... Zhou, Q. (2016). Complete meiosis from embryonic stem cell-derived germ cells in vitro. *Cell Stem Cell*, 18(3), 330–340. Online: <https://doi.org/10.1016/j.stem.2016.01.017>



EFECTOS DEL PLOMO Y CROMO EN LA GERMINACIÓN Y ARQUITECTURA DE RAÍZ DE PLÁNTULAS DE *TYPHA LATIFOLIA* (TYPHACEAE)

EFFECTS OF LEAD AND CHROMIUM ON GERMINATION AND ROOT ARCHITECTURE OF *TYPHA LATIFOLIA* (TYPHACEAE) SEEDLINGS

Renato Oquendo¹ , Loiret Fernández² , Galo Pabón-Garcés¹
y Lucía Vásquez-Hernández*¹

¹Universidad Técnica del Norte, 100104, Ibarra, Ecuador. [<https://ror.org/049784n50>]

²Universidad de La Habana, 10400, La Habana, Cuba. [<https://ror.org/04204gr61>]

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

Manuscrito recibido el 21 de julio de 2021. Aceptado, tras revisión el 11 de julio de 2023. Publicado el 1 de marzo de 2026.

Resumen

El presente trabajo evalúa el efecto de diferentes concentraciones de plomo y cromo sobre la arquitectura de raíz y porcentaje de germinación de *Typha latifolia*. Para ello, se recolectaron semillas viables de dos sitios en la Laguna de Yahuarcocha (Ibarra-Ecuador). Con relación al porcentaje de germinación se trataron las semillas con procesos pre-germinativos; posteriormente fueron expuestas a concentraciones de 50, 100 y 200 ppm de plomo y 10, 20, 40 ppm de cromo. Para el análisis de la arquitectura de la raíz se cultivaron plántulas de *T. latifolia* por cuatro semanas en solución Hoagland al 50%, luego fueron trasladadas a rizotrones en los que se añadieron los metales pesados en concentraciones similares al ensayo de germinación. Las plántulas se mantuvieron en dichas condiciones por 15 días en los que se registraron variables como el número de raíces, área total, y longitud total. Se realizaron registros fotográficos de los parámetros en estudio y fueron analizados en el programa ImageJ y su extensión SmartRoot. En el porcentaje de germinación se encontró que los dos metales afectan al proceso de germinación, especialmente el cromo, con el que se obtuvo porcentajes de germinación menores al 15% y con plomo con un 25%. Con respecto a la arquitectura de raíz el número de raíces y la longitud total no varió entre el control y los tratamientos con metales. Sin embargo, el tratamiento referente al área total de la raíz tratada con cromo presentó diferencias significativas con respecto al control.

Palabras clave: Fisiología vegetal, metales pesados, plantas acuáticas, rizotrófon, Yahuarcocha, *Typha latifolia*, Ecuador.

Abstract

This research evaluates the effect of different concentrations of lead and chromium on root architecture and germination percentage of *Typha latifolia*. Seeds of *Typha latifolia* were collected from Yahuarcocha Lagoon (Ibarra-Ecuador). Pre-germinative treatments and exposure to lead concentrations of 50, 100, and 200 ppm, as well as 10, 20, and 40 ppm of chromium concentrations were applied to the seeds to measure the germination percentage. Regarding root architecture analysis, *T. latifolia* seedlings were grown for four weeks in 50% Hoagland solution and then transferred to rhizotrons, where the heavy metals were added to concentrations like the germination test. The seedlings were kept in these conditions for 15 days and variables such as number of roots, total area, and total length were recorded. Photographic records of the parameters under study were taken and analyzed in Image J and its SmartRoot extension. It was found that both heavy metals affected (significantly) the germination process, especially chromium. Germination percentages lower than 15% and 25% for lead were also obtained. Concerning root architecture, the number of roots and total length from heavy metal treatments were not significantly different from control. However, the total area treatment with chromium showed significant differences with respect to the control.

Keywords: Plant physiology, heavy metals, aquatic plants, rhizotron, Yahuarcocha, *Typha latifolia*, Ecuador.

Forma sugerida de citar: Oquendo, R., Fernández, L., Pabón-Garcés, G. y Vásquez-Hernandez, L. (2026). Efectos del plomo y cromo en la germinación y arquitectura de raíz de plántulas de *Typha latifolia* (Typhaceae). *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*. Vol. 43(1):150-165. <https://doi.org/10.17163/lgr.n43.2026.08>.

Orcid IDs:

Renato Oquendo: <https://orcid.org/0000-0001-6916-3834>

Loiret Fernández: <https://orcid.org/0000-0002-2058-781X>

Galo Pabón-Garcés: <https://orcid.org/0000-0001-6044-4429>

Lucía Vásquez-Hernandez: <https://orcid.org/0000-0002-1876-0759>

1 Introducción

La contaminación ambiental por metales pesados ha aumentado significativamente debido a las actividades antrópicas, en especial las generadas por prácticas industriales. Estos contaminantes, al no ser sustancias biodegradables, producen efectos letales sobre las plantas tales como la reducción de la tasa de transpiración y la división celular (Sharma y cols., 2022). Como respuesta a su exposición, se reduce el porcentaje de germinación de las semillas, hay inactivación de enzimas esenciales, afectando a la fotosíntesis y la regulación hídrica de la planta (Zaidi y cols., 2012); además, pueden causar efectos en su morfología tales como la disminución de su biomasa, diámetro, longitud, área y distribución en el suelo, así como la reducción de raíces laterales y adventicias (Baligar y cols., 1998).

La raíz de las especies vegetales es de vital importancia en su desarrollo y crecimiento, ya que realiza la absorción de agua, nutrientes y minerales del suelo, razón por la cual presenta una plasticidad en su arquitectura que depende de las condiciones y tipo de suelo (Armengaud y cols., 2009; Franco y cols., 2011). Las raíces de plantas tolerantes a metales pesados y estrés abiótico son capaces no sólo de responder a las deficiencias de nutrientes, sino también al exceso de metales en el suelo, lo que provoca la disminución de sus parámetros de crecimiento como la elongación de la raíz, la producción de biomasa y producción de pelos radicales por la toxicidad y alteración de procesos fisiológicos (Barceló y Poschenrieder, 1992; Kahle, 1993).

A pesar del daño inminente de los metales pesados, se conocen ciertas plantas por su tolerancia a estos contaminantes, incluso pues son capaces de incorporar estos compuestos mediante el proceso de absorción, siendo almacenados en la vacuola de la célula y evitando los daños antes mencionados (Pal Singh y cols., 2013). Este es el caso de *Typha latifolia*, especie acuática que se distribuye en el hemisferio norte y que fue introducida y naturalizada

en América del Sur, África Oriental, Australia y Hawái Smith2018, que por su umbral de tolerancia se considera como una hiperacumuladora de metales pesados en sus raíces, pudiendo llegar a tener concentraciones superiores al sustrato circundante (Branković y cols., 2011).

Sin embargo, a pesar de tolerar los metales también sufre cambios en la arquitectura y un decrecimiento gradual de su raíz, dependiendo de la concentración de metal a la que esté expuesta. Con relación al plomo, se ha reportado un umbral de afectación del crecimiento en un rango de 200–500 ppm y para el cromo en un rango de 10–60 ppm (Sasmaz y cols., 2008; Chen y cols., 2014; Han y cols., 2015).

Para cuantificar estos cambios se han utilizado diversas técnicas, entre ellas se destaca el análisis de la arquitectura de la raíz, que consiste en la observación sistemática de una serie de variables medibles en aparatos denominados rizotrones que permiten manipular concentraciones de nutrientes y otros factores externos (Busch y cols., 2006). La descripción del sistema radicular en plantas desarrolladas en rizotrones permite documentar el crecimiento y la forma de las raíces lo que ayuda a conocer su morfología, topología y la interacción entre raíces (Lobet y cols., 2011).

Asimismo, el estudiar la germinación de semillas de plantas de humedales tolerantes a metales pesados, como el caso de *Typha latifolia*, permitirá determinar el grado de resistencia de sus semillas a la presencia de los contaminantes (Zhang, 2015), lo que tiene gran importancia en proyectos de restauración ecológica y remediación ambiental.

En consideración a lo mencionado, el objetivo de este trabajo es cuantificar el efecto de diferentes concentraciones de plomo y cromo sobre la germinación de semillas y arquitectura de la raíz de plántulas de *Typha latifolia* en condiciones de laboratorio.

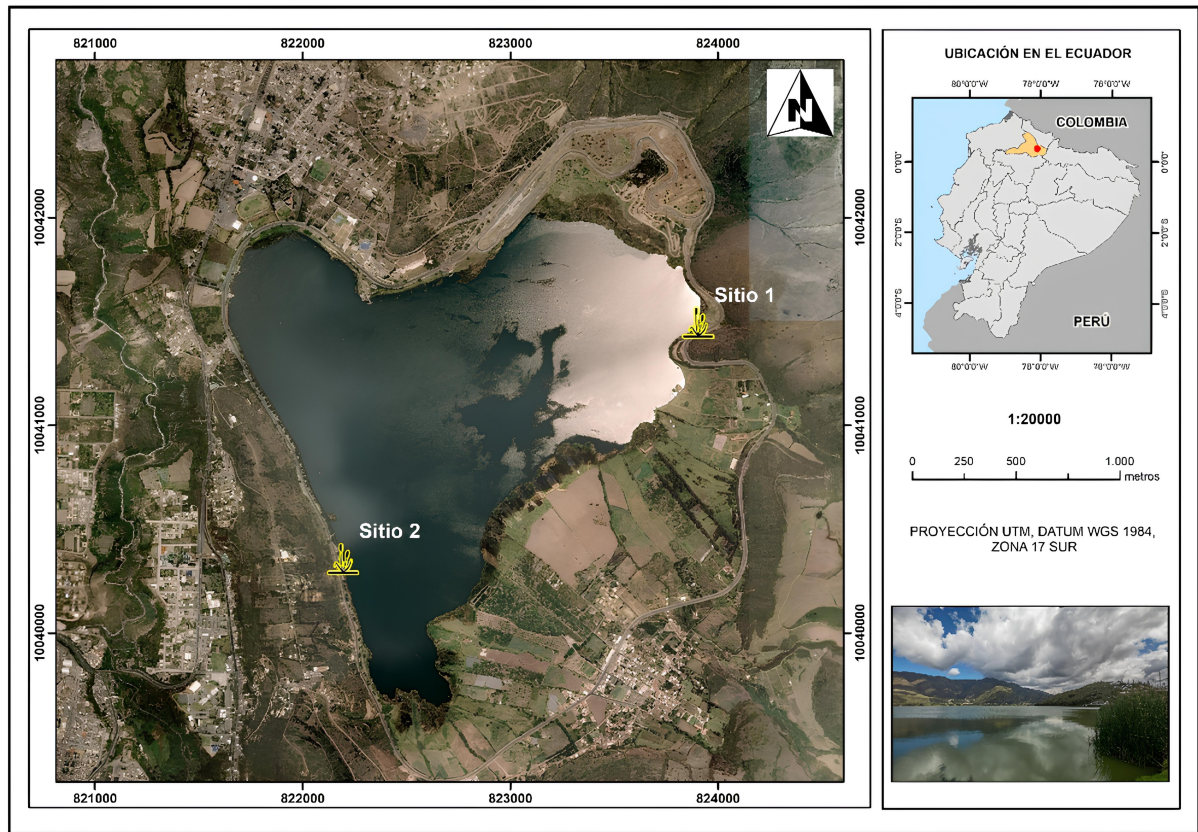


Figura 1. Sitios de colecta de semillas de *T. latifolia* en la Laguna de Yahuarcocha. Sitio 1: orilla Noreste de la laguna; Sitio 2: orilla Suroeste. Fecha de colecta: abril–mayo 2021 (época lluviosa).

2 Materiales y Métodos

2.1 Recolección de Semillas

Se emplearon semillas de *Typha latifolia*, recolectadas de poblaciones de crecimiento espontáneo de la Laguna de Yahuarcocha (2200 msnm), ubicada en la provincia de Imbabura, Ecuador (Figura 1). Se seleccionaron dos sitios de colecta: el primero ubicado en la orilla Noreste de la laguna (Sitio 1), conocido por los lugareños como “la vuelta de la paloma”, y el Sitio 2, ubicado en la orilla Suroeste de la misma, en el sector conocido como “la recta de ingreso al poblado de San Miguel de Yahuarcocha”.

Se procedió a la colecta de una inflorescencia madura por planta (de color marrón oscuro según Smith (2018)), con un total de 20 inflorescencias (diez por cada sitio de muestreo). Se conservaron

refrigeradas a 3 °C durante siete días. La colecta se realizó en la época lluviosa de abril–mayo de 2021.

2.2 Germinación de las semillas

Las semillas, que se contabilizan entre 20 mil y 700 mil por espiga (Smith, 2018), se desinfectaron con hipoclorito de sodio al 2,5% (USDA, 2016). Posteriormente se colocaron en placas Petri con agua desionizada con el objetivo de seleccionar las semillas viables (aquellas que se hunden) de las no viables (las que flotan) (Bourgeois y cols., 2012). En total se seleccionaron 600 semillas viables (300 por sitio) que se colocaron en tres cajas Petri (100 por caja).

Cada grupo de semillas se sumergió en agua ligeramente salina (1% de NaCl) con un pH de entre 6,5 y 7,5 por 24 h, como lo recomienda, para esta especie Semenova (2014). Finalmente, las semillas se

sumergieron a una profundidad de 0,5 cm en agua destilada hasta su germinación, con un fotoperíodo de 12 h/12 h y una temperatura promedio de 21 °C.

No se realizó tratamiento de escarificación, ya que según el Royal Botanical Gardens, Kew (2016) este reduce la germinación a niveles inferiores al 58% en *Typha latifolia*. Los tratamientos control fue-

ron 100 semillas procedentes de los sitios 1 (control 1) y 2 (control 2), hidratadas en agua destilada durante 20 días, con tres repeticiones (Tabla 1).

El efecto del plomo sobre la germinación se evaluó adicionando en cada placa Petri concentraciones de: 50 ppm, 100 ppm y 200 ppm, en forma de $Pb(NO_3)_2$, con tres repeticiones (Tabla 2).

Tabla 1. Condiciones experimentales de los tratamientos en la prueba de germinación de semillas de *Typha latifolia* procedentes de dos sitios de muestreo de la Laguna de Yahuarcocha.

Tratamiento	Repeticiones	Descripción*
Sitio 1	3	100 semillas del Sitio 1, hidratadas en agua salina (1% de NaCl) por 24 h; luego hidratadas en agua destilada durante 20 días.
Sitio 2	3	100 semillas del Sitio 2, hidratadas en agua salina (1% de NaCl) por 24 h; luego hidratadas en agua destilada durante 20 días.
Control 1	3	100 semillas del Sitio 1, hidratadas en agua destilada durante 20 días.
Control 2	3	100 semillas del Sitio 2, hidratadas en agua destilada durante 20 días.

*Condiciones generales del experimento: pH entre 6,5 y 7,5; fotoperíodo de 12 h/12 h; temperatura promedio de 21 °C; profundidad de hidratación 0,5 cm.

Tabla 2. Condiciones de los tratamientos en la prueba de los efectos de las concentraciones diferentes de plomo (Pb) en la germinación de semillas de *Typha latifolia* procedentes de la Laguna de Yahuarcocha.

Tratamiento	Repeticiones	Descripción*
0 ppm (control)	3	100 semillas hidratadas en agua destilada sin plomo, durante 20 días.
50 ppm	3	100 semillas hidratadas en agua destilada con 50 ppm de plomo, durante 20 días.
100 ppm	3	100 semillas hidratadas en agua destilada con 100 ppm de plomo, durante 20 días.
200 ppm	3	100 semillas hidratadas en agua destilada con 200 ppm de plomo, durante 20 días.

*Condiciones generales del experimento: semillas hidratadas en agua salina (1% de NaCl) por 24 h, previo a la adición de diferentes concentraciones de plomo; pH entre 6,5 y 7,5; fotoperíodo de 12 h/12 h; temperatura promedio de 21 °C; profundidad de hidratación 0,5 cm.

Para evaluar el efecto del cromo sobre la germinación se usaron concentraciones de: 10 ppm, 20 ppm y 40 ppm, en forma de $K_2Cr_2O_7$, igualmente, con tres repeticiones en cada caso (Tabla 3). En am-

bos conjuntos los tratamientos de control fueron las semillas hidratadas con agua salina al 1% de NaCl durante 24 h (como tratamiento pregerminativo), y luego hidratadas con agua destilada.

Tabla 3. Condiciones de los tratamientos en la prueba de los efectos de las concentraciones diferentes de cromo (Cr) en la germinación de semillas de *Typha latifolia* procedentes de la Laguna de Yahuarcocha.

Tratamiento	Repeticiones	Descripción*
0 ppm (control)	3	100 semillas hidratadas en agua destilada sin cromo, durante 20 días.
10 ppm	3	100 semillas hidratadas en agua destilada con 10 ppm de Cromo, durante 20 días.
20 ppm	3	100 semillas hidratadas en agua destilada con 20 ppm de Cromo, durante 20 días.
40 ppm	3	100 semillas hidratadas en agua destilada con 40 ppm de Cromo, durante 20 días.

*Condiciones generales del experimento: semillas hidratadas en agua salina (1% de NaCl) por 24 h, previo a la adición de diferentes concentraciones de Cromo; pH entre 6,5 y 7,5; fotoperíodo de 12 h /12 h, temperatura promedio de 21 °C; profundidad de hidratación 0,5 cm.

En un primer experimento, la variable evaluada fue el porcentaje de germinación de los sitios 1 y 2 respecto al porcentaje de germinación de los tratamientos control (1 y 2). Luego, en un segundo y tercer experimento, se evaluó el porcentaje de germinación en los tratamientos con semillas hidratadas con distintas concentraciones de plomo y cromo, respectivamente, como se explicó anteriormente.

2.3 Arquitectura de raíz

Para estudiar el crecimiento de las raíces se construyó un rizotrón, cuyas medidas fueron: 40 cm de frontal, 8 cm de ancho (lateral) y 40 cm de profundidad (en sentido de la gravedad) (Figura 2). El rizotrón se acondicionó con doble vidrio frontal de 5 mm de ancho, lo que permitió realizar un se-

guimiento temporal del crecimiento de las raíces, mediante un registro fotográfico.

En la superficie del medio de cultivo (solución Hoagland estándar al 50%) se colocó una lámina de corcho de 4 mm y sobre esta se colocaron las plántulas obtenidas a partir de semillas del tratamiento control del experimento de germinación. En total se trasplantaron 3 plántulas en cada rizotrón (45 días después de su germinación), con un total de 21 plántulas.

El registro fotográfico se realizó a los 0 (cero), 5, 10, y 15 días después del trasplante (ddt). Los rizotrones se colocaron al aire libre con presencia de sol a una altitud aproximada de 2220 msnm y una temperatura promedio de 20°C.

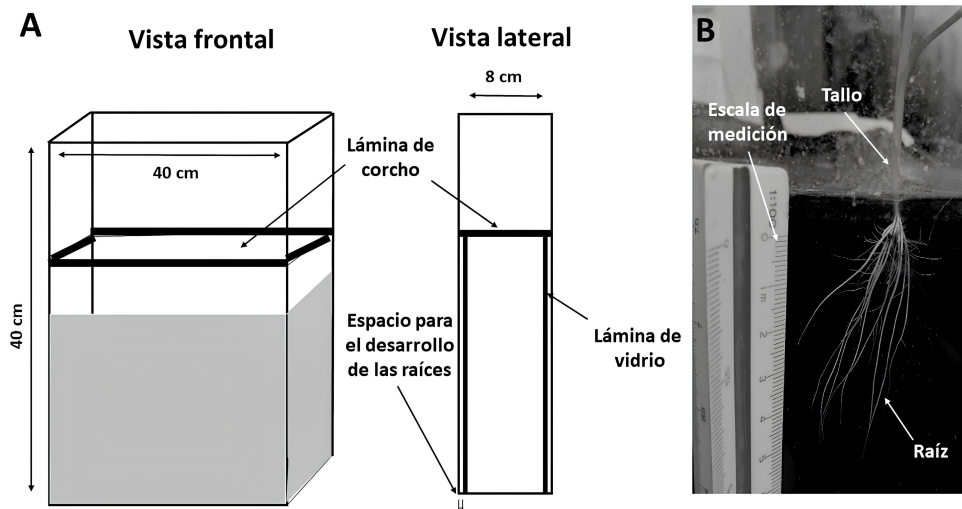


Figura 2. Características del rizotrón construido. A. Dimensiones del recipiente tanto de la vista frontal y lateral. B. Vista frontal de plántula de *Typha* creciendo en el rizotrón.

2.4 Condiciones de crecimiento

Cada rizotróon se llenó con 8 L de solución Hoagland 1/2 de fuerza para simular las condiciones naturales con las que crecen en el sitio de colecta (Hoagland y Arnon, 1938), a los que se adicionaron soluciones hasta obtener concentraciones de 50, 100 y 200 ppm de plomo y 10, 20, 40 ppm de cromo. Las concentraciones de las soluciones de los metales se eligieron de acuerdo con la tolerancia de la especie reportada en la bibliografía y con los rangos encontrados de los metales en los estudios previos de caracterización de agua, suelo, sedimento y raíz de *Typha latifolia* en la Laguna de Yahuarcocha (Oquendo y cols., 2020).

Se utilizaron como tratamiento control aquellas plántulas que crecieron únicamente en solución Hoagland estándar al 50%. Los experimentos de germinación y arquitectura de raíz de *Typha latifolia* se realizaron en el laboratorio de investigaciones ambientales de la Universidad Técnica del Norte (LABINAM).

2.5 Análisis de las imágenes

Las fotografías secuenciales de todas las raíces en los tiempos especificados de registro (0, 5, 10 y 15 días de trasplante) se procesaron en el programa *ImageJ* y su extensión *SmartRoot*. Las variables evaluadas fueron: Número de Raíces, Área Total (cm²) y Longitud Total (cm) del sistema radical de las plántulas.

2.6 Análisis estadístico

Con los datos obtenidos del porcentaje de germinación de las semillas de *Typha latifolia*, los efectos de plomo y cromo en la germinación y los efectos de estos metales pesados sobre crecimiento de las raíces (en rizotróon), se realizaron tres análisis de varianza de clasificación simple.

El primero comparó la germinación de semillas en agua destilada (Control 1 y 2) respecto a la germinación con tratamiento pregerminativo —semillas hidratadas en agua salina (1% de NaCl) por 24 h—, tanto en el sitio 1 como en el sitio 2. El segundo y tercer análisis de varianza determinó el efecto de las diferentes concentraciones de metales pesados (plomo y cromo) sobre las variables porcentaje de germinación de semillas (en el caso del segundo

análisis de varianza) y número de raíces, área y longitud de la raíz (para el tercer análisis de varianza).

Posteriormente, se realizó una prueba de Tukey para cada análisis de varianza. Los datos se sometieron a la verificación del cumplimiento de las premisas de normalidad y homogeneidad de varianzas, mediante las pruebas de Shapiro-Wilk y Levene, respectivamente. El nivel de significancia usado fue de 0,05 y el programa informático empleado fue *Statistica* versión 10.

3 Resultados y Discusión

3.1 Germinación

Las semillas de *Typha latifolia* sometidas a tratamiento pregerminativo, es decir aquellas que se hidrataron en agua salina (1% de NaCl) por 24 h, y posteriormente se hidrataron con agua destilada por 20 días, procedentes del Sitio 1 germinaron en un 86,5% \pm 9,2% de desviación estándar; mientras que aquellas semillas procedentes del Sitio 2 presentaron porcentajes de germinación similares de 81,4% \pm 5,9% de desviación estándar.

Si se compara con las semillas que solo se hidrataron en agua destilada por 20 días, cuyos valores de germinación disminuyeron hasta 60,4% (\pm 5,7% de desviación estándar) para el Control 1 y hasta 57,2% (\pm 5,5% de desviación estándar) para el Control 2 (Figura 3).

No se evidenciaron diferencias significativas entre los porcentajes de germinación de las semillas procedentes de los dos sitios seleccionados, pero sí se observaron diferencias significativas de las semillas provenientes de estos dos sitios (columnas a) respecto a sus respectivos controles (1 y 2) cuyas semillas no recibieron tratamiento pregerminativo (columnas b).

En relación con los porcentajes de germinación bajo los efectos de diferentes concentraciones de metales pesados durante su fase de hidratación (Figura 4A), los resultados (que presentan sus respectivas desviaciones estándar) respecto a la adición de plomo fueron de 47,4 \pm 8,7% de germinación en concentraciones de 50 ppm, de 40,7 \pm 8,0% en 100 ppm, y disminuyeron hasta los 22,1 \pm 4,8% en

200 ppm de plomo.

El porcentaje de germinación del tratamiento control (tratamiento pregerminativo + hidratación) fue de $84,0 \pm 9,2\%$. Se evidencian diferencias esta-

dísticamente significativas entre el tratamiento control (a), las concentraciones de 50 y 100 ppm (b) y la concentración de 200 ppm de plomo (c) (Figura 4A).

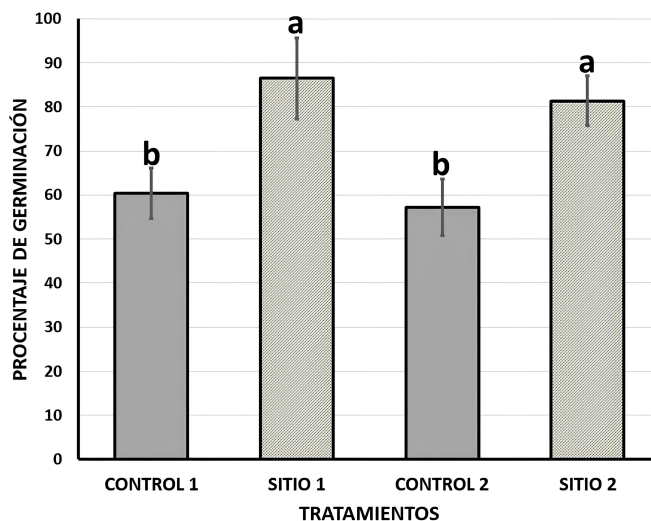


Figura 3. Porcentaje de germinación de semillas de *Typha latifolia* de la Laguna de Yahuarcocha. Las semillas control (1 y 2, columnas señaladas por b) se hidrataron durante 20 días, mientras que las semillas de los sitios 1 y 2 (señaladas con a) se sometieron a hidratación previa con agua salina (1% de NaCl) por 24 h, como tratamiento pregerminativo. Las letras distintas representan diferencias significativas entre los tratamientos ($p < 0,05$).

La germinación en 10 ppm de cromo fue baja, alcanzando valores de $25,4 \pm 7,3\%$. Con 20 ppm de cromo, el porcentaje disminuyó hasta los $18,2 \pm 5,3\%$. Finalmente, en concentraciones de 40 ppm de cromo la germinación fue $13,2 \pm 4,9\%$.

El porcentaje de germinación del tratamiento control (tratamiento pregerminativo + hidratación) fue de $84,0 \pm 9,2\%$ (Figura 4B). En este caso, las diferencias significativas detectadas se presentaron entre el tratamiento control (a) y las tres concentraciones de cromo usadas en el experimento (b): 10, 20 y 40 ppm.

3.2 Arquitectura de la raíz

Dentro del experimento del efecto del plomo sobre el número de raíces de las plántulas que crecieron en el rizotrófon, no se detectaron diferencias estadísticamente significativas (ns), aunque en números absolutos se incrementó la cantidad de raíces desde el día del trasplante (cero ddt) hasta los 15 ddt que culminó la evaluación (Figura 5A).

Los resultados (en todos los casos se presentan con los respectivos datos de desviación estándar) muestran que el tratamiento control incrementó li-

geramente el número de raíces de $8,3 \pm 0,6$ raíces hasta los $9,3 \pm 2,3$ raíces a los 15 ddt. El mayor incremento ocurrió en concentraciones de 50 ppm de plomo, desde las $9,0 \pm 1,0$ raíces (a los cero ddt) hasta las $14,7 \pm 4,0$ raíces a los 15 ddt. En concentraciones de 100 ppm de plomo, el número promedio de raíces no experimentó variación ($7,7 \pm 0,9$ raíces) durante todo el experimento. No se evidenciaron diferencias significativas en cuanto al número de raíces entre los distintos tratamientos (50, 100 y 200 ppm de plomo), incluyendo la comparación de estos con el tratamiento control (Figura 5A).

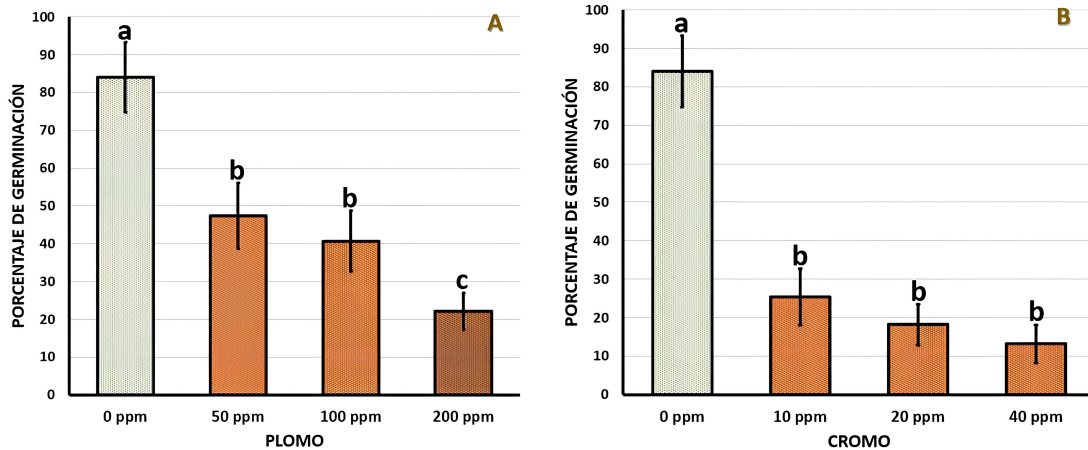


Figura 4. Porcentaje de semillas germinadas de *T. latifolia* con los tratamientos: A plomo, B cromo. Se muestran los valores medios y la desviación estándar. Las letras distintas muestran diferencias significativas según la prueba de Tukey ($p < 0,05$). El experimento se replicó tres veces ($n = 3$).

De manera similar, se registró un ligero incremento del número de raíces en presencia de cromo añadido al medio de cultivo, sin embargo, a diferencia del caso del plomo, el mayor incremento se identificó en la mayor concentración de cromo (40 ppm), donde el número de raíces varió ligeramente, aunque sin diferencias significativas, desde $9,0 \pm 1,7$ hasta $13,7 \pm 1,5$ al final del experimento (15 ddt). En este caso tampoco se evidenciaron diferencias estadísticas en cuanto al número de raíces entre los distintos tratamientos (10, 20 y 40 ppm de cromo), incluyendo la comparación de estos con el tratamiento control (Figura 5B).

El promedio del área total de la raíz (cm^2) se incrementó entre aproximadamente tres y seis veces en los 15 días de evaluación, tanto en el tratamiento control, como en los tratamientos de 50, 100 y 200 ppm de plomo añadido. El mayor incremento del área total de la raíz se evidenció en concentra-

ciones de 100 ppm de plomo, donde los valores pasaron de $4,00 \pm 2,1 \text{ cm}^2$ hasta los $24,8 \pm 7,8 \text{ cm}^2$.

Por el contrario, el menor incremento se presentó en concentraciones de 200 ppm de plomo, con valores iniciales de $6,5 \pm 3,3 \text{ cm}^2$ y finales de $13,4 \pm 7,7 \text{ cm}^2$. Sin embargo, no se detectaron diferencias significativas entre los cuatro tratamientos (Figura 6A).

En presencia de cromo añadido al medio de cultivo, no se registró incremento en el área total de las raíces a ninguna concentración de cromo (10, 20 y 40 ppm), ya que los valores permanecieron constantes (Figura 6B). Solo el promedio del área total de las raíces del tratamiento control incrementó su valor desde $5,4 \pm 3,7 \text{ cm}^2$, hasta $18,0 \pm 2,9 \text{ cm}^2$, por lo que se detectaron diferencias significativas entre el control (a) y cada uno de los tres tratamientos experimentales con 10, 20 y 40 ppm y cromo (b).

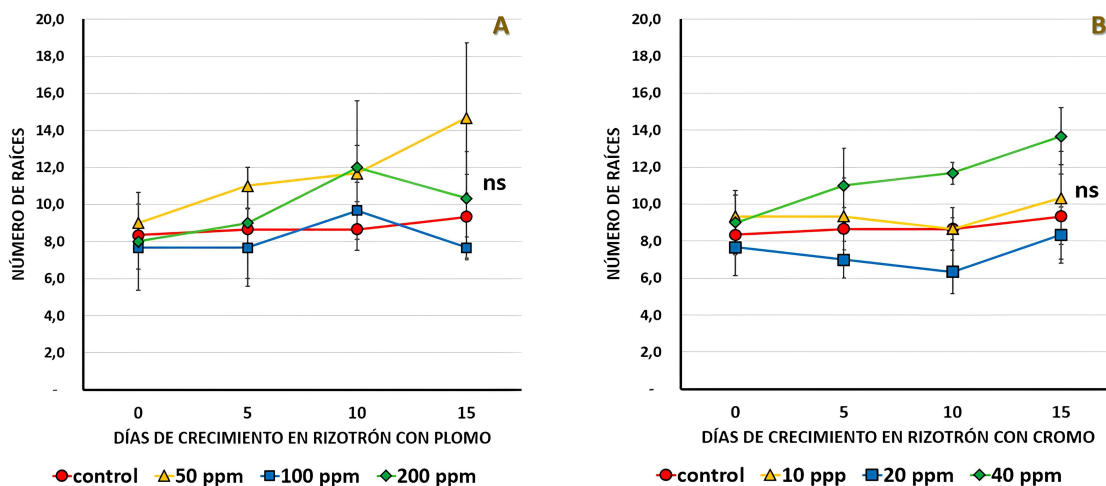


Figura 5. Variación en el número de raíces de *T. latifolia* en presencia de diferentes concentraciones de plomo (A) y cromo (B) en el medio de cultivo. Se muestran los valores medios y la desviación estándar. No se presentan diferencias significativas según la prueba de Tukey al 0,05; $n = 3$.

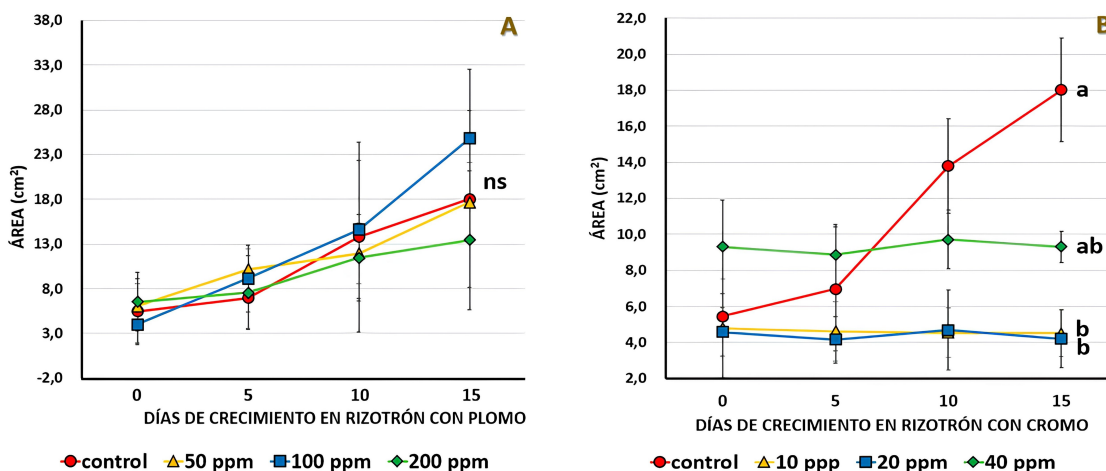


Figura 6. Variación del área de la raíz de *T. latifolia* en presencia de diferentes concentraciones de plomo (A) y cromo (B) en el medio de cultivo. Se muestran los valores medios y desviación estándar. Letras diferentes muestran diferencias significativas según la prueba de Tukey al 0,05; $n = 3$.

La longitud total de la raíz (cm) ante concentraciones diferenciales de plomo en el medio de cultivo presentó un incremento constante a lo largo del experimento en todos los tratamientos, que fue ligeramente mayor en las concentraciones de 50 ppm y 100 ppm de plomo, con valores de $22,4 \pm 2,2$ cm al inicio y $52,9 \pm 16,4$ cm al final; y $19,2 \pm 3,5$ cm al inicio y $51,1 \pm 16,7$ cm, respectivamente, al finalizar el experimento. No se identificó la existencia

de diferencias significativas entre los tratamientos (Figura 7A).

Por otra parte, la adición de distintas concentraciones de cromo a la solución Hoagland produjo un incremento de los valores de la longitud total de la raíz en concentraciones de 40 ppm de cromo (de $27,4 \pm 5,7$ cm hasta $35,4 \pm 6,8$ cm), y un ligero incremento de la longitud de la raíz en concentra-

ciones de 10 ppm de cromo (de $16,5 \pm 3,6$ cm hasta $20,4 \pm 6,1$ cm).

Por el contrario, en concentraciones de 20 ppm de cromo la longitud de la raíz disminuyó de $17,4 \pm 4,9$ a $15,0 \pm 1,9$ cm, durante los 15 días de evalua-

ción, producto de la muerte de las raíces laterales antes contabilizadas, que determinaron que el promedio de la longitud final sea menor. El mayor incremento se midió en el tratamiento control que pasó desde los $25,0 \pm 11,9$ cm hasta los $42,6 \pm 21,2$ cm de longitud en 15 días de crecimiento (Figura 7B).

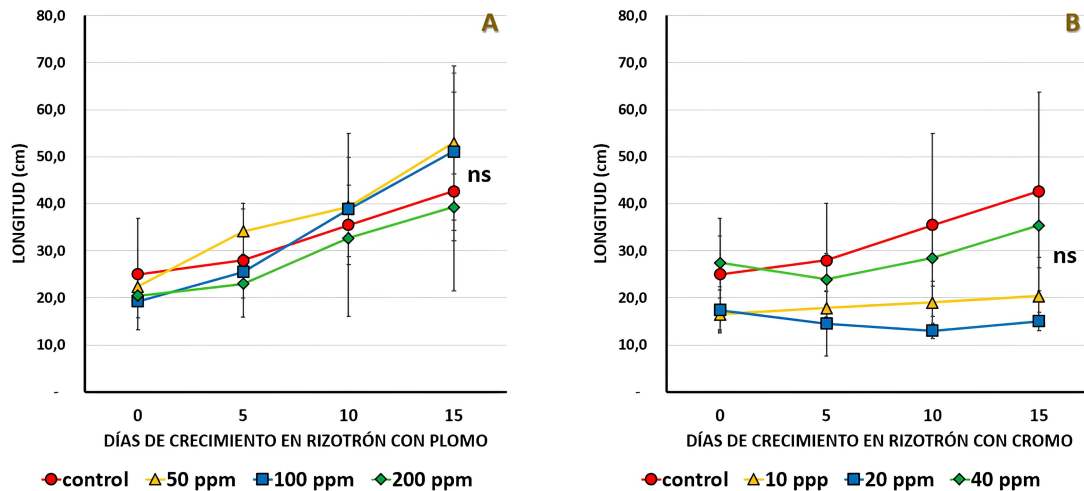


Figura 7. Variación de la longitud de la raíz de *T. latifolia* en presencia de diferentes concentraciones de plomo (A) y cromo (B); se muestran los valores medios y desviación estándar. No se observan diferencias significativas según la prueba de Tukey al 0,05; $n = 3$.

3.3 Discusión

Varios factores pueden afectar a la planta madre durante el desarrollo de la semilla y provocar cambios en las características de germinación (Baskin y Baskin, 2014). En este sentido, la plasticidad fenotípica se considera uno de los principales medios de adaptación de las semillas a las condiciones ambientales cambiantes a las que se ven expuestas (Gratani, 2014).

Por ejemplo, en semillas maduras de *Typha latifolia*, la germinación tradicional se realizaba únicamente hidratándose en agua destilada; sin embargo, el tratamiento pregerminativo de hidratación en solución de NaCl al 1% por 24 h incrementó significativamente la germinación en comparación con el tratamiento tradicional, en un promedio de 25,2%, coincidiendo con los incrementos en la germinación descritos por Semenova (2014). Posiblemente esta solución podría actuar neutralizando el efecto de inhibidores potenciales de la germinación y

así retardar el crecimiento de microorganismos que afectan negativamente a la germinación (Lorenzen y cols., 2000).

Según USDA (2016), las semillas de *T. latifolia* alcanzan porcentajes altos de germinación si se siguen los procedimientos correctos, descartándose la escarificación mecánica que según Royal Botanical Gardens, Kew (2016) no incide en el incremento de la germinación, ya que las semillas de la espadaña son lo suficientemente permeables al agua como para desencadenar la germinación. El alto porcentaje de germinación de sus semillas podría deberse a que esta especie no presenta ningún tipo de latencia (Stewart y cols., 1997); aunque Nishihiro y cols. (2004) mencionan que en *Typha angustifolia*, una especie muy similar a *T. latifolia*, se han observado mecanismos de latencia fisiológica que podrían ser comunes para todo el género *Typha* (Baskin y Baskin, 2014).

La germinación con semillas procedentes de los

dos sitios analizados no presenta diferencias significativas ya que la Laguna de Yahuarcocha es de tipo no estratificado, en el que sus aguas están mezcladas a lo largo de todo el año, ya sea por influencia de los vientos o por los afluentes que descargan en la laguna, como consta en el Plan de Manejo de la Laguna Yahuarcocha (?); por lo que con base en la germinación de *T. latifolia*, los dos sitios corresponden a una población única ubicada dentro de la laguna.

Con relación al efecto de los metales pesados sobre la germinación, los resultados (Figuras 4A y 4B) muestran que tanto el plomo como el cromo, en las concentraciones analizadas, disminuyeron significativamente la germinación. A menudo estos metales pesados tienen efectos inhibidores sobre este proceso, como lo demostró ? y Pandey y cols. (2008). El plomo, por ejemplo, en concentraciones de 50 ppm disminuyó un 43% la germinación, y a la mayor concentración analizada (200 ppm) la disminución fue del 74%.

La marcada disminución en la germinación podría deberse a que el plomo (Pb), un metal no esencial, causa toxicidad en las plantas durante mucho tiempo, con cambios adversos en la morfología y germinación de semillas, así como en actividades enzimáticas (Nas y Ali, 2018). Estos efectos son más prominentes con el aumento de la concentración y una exposición más prolongada. Después de reaccionar con el grupo sulfhidrilo, el plomo inhibe las actividades de las enzimas al producir especies reactivas de oxígeno (ROS) que provocan estallidos oxidativos (Zulfiqar y cols., 2019). Gautam y cols. (2010) determinaron que en semillas de *Oryza sativa* la disminución de la germinación se debió a la inhibición de la producción de actividad de α -amilasa, lo que a su vez inhibe el proceso de degradación del almidón, lo que también podría presentarse en plantas gramíneas y graminoides (Sharma y cols., 2022) como en el caso de las especies de *Typhaceae*.

La disminución de la germinación es mucho mayor en presencia de cromo, ya que con solo 10 ppm la germinación se redujo en un 70%, y con 40 ppm de cromo la germinación decayó en un 85%. Los efectos tóxicos del cromo comprometen la fisiología de la germinación de las semillas (Zaranyika y Nyati, 2017). Sin embargo, Rout y cols. (2000) demostraron que, pese a la disminución de la ger-

minación inicial, las semillas pueden alcanzar tolerancia y aclimatación al cromo, sobre todo cuando las plantas madre provienen de sitios contaminados en relación con sitios no contaminados, características propias de las especies conocidas como hiperacumuladoras.

Por otra parte, la tolerancia a los metales pesados también depende de condiciones genéticas de cada planta. En el estudio publicado por Cheng y cols. (2008) en 12 genotipos de *Oryza sativa* y de Zhang (2015) en especies acuáticas y palustres como: *Phragmites australis*, *Arundo donax*, *Cyperus alternifolius* y *Alisma plantago-aquatica*, los resultados mostraron una gran variabilidad de respuestas adaptativas, aunque en general el índice de germinación disminuyó significativamente con el aumento de las concentraciones de cromo. Pan y cols. (2008) mencionan que las respuestas sin patrones predecibles frente a mayores niveles de cadmio, cromo, mercurio, son respuestas que dependen de la constitución genética de dichas plantas.

En relación con la arquitectura de la raíz, el crecimiento del sistema radical de *T. latifolia* en los rizotrones permitió establecer cambios en la estructura de la raíz como respuesta a diferentes concentraciones de plomo y cromo. La solución de Hoagland, utilizada como medio para determinar la estructura de la raíz, a su vez permitió recrear las condiciones fisicoquímicas nutricionales de la Laguna de Yahuarcocha.

Las raíces post embrionarias se formaron dentro de los 5 días posteriores al trasplante y continuaron creciendo 15 y 20 días después, estableciendo un sistema de raíces altamente ramificadas y funcionales.

Con respecto a las plántulas expuestas a concentraciones diferentes de plomo, el número promedio de raíces no sufrió una disminución, incluso en concentraciones de 200 ppm (Figura 5A), mostrando gran tolerancia a este metal. Buta y cols. (2011) reportaron resultados similares en ensayos con plantas de *Eichhornia crassipes* expuestas a plomo, en las que no se evidenció un decrecimiento en el desarrollo de la raíz por la presencia de plomo, concluyendo que se trata de una especie acuática tolerante, que se utiliza en procesos de depuración de aguas residuales.

En contraste, estudios realizados en *Hydrocotyle umbellata* una especie acuática, reportan que la exposición a los metales cromo y plomo, en diferentes concentraciones, provocaron disminución en la productividad total de la biomasa. También se observó que en concentraciones altas de cromo el sistema radical cambió de color a marrón oscuro, además de producir necrosis foliar (Yongpisanphop y cols., 2005). De igual forma, estudios realizados en *Fagus sylvatica* mostraron que la elongación y biomasa de la raíz fueron significativamente reducidas en suelos con concentraciones de 44 ppm de plomo; además, la arquitectura de la raíz tuvo una morfología anormal, con un desarrollo de pelos radicales fuertemente inhibidos (Breckle y Kahle, 1992; Kumar Yadav y cols., 2021).

Los resultados de los tratamientos de las plántulas de *T. latifolia* expuestas a cromo no evidenciaron una disminución del número promedio de raíces, mostrando tolerancia de *T. latifolia* a este metal pesado. Sin embargo, muchas plántulas tuvieron un crecimiento anómalo (aspecto raquítrico) de la raíz y un marcado amarillamiento de las hojas al final del experimento. En un estudio similar, en el que se colocaron plántulas de *Arabidopsis thaliana* en diferentes concentraciones de cromo, estas fueron más tolerantes al estrés por el metal en concentraciones menores; sin embargo, el incremento gradual de la concentración de cromo generó inhibición del crecimiento (Martínez-Trujillo y cols., 2013). Es así como Ortiz-Castro y cols. (2007) reportan que el cromo en el sistema radicular y arquitectura en plántulas de *Arabidopsis thaliana* en concentraciones mayores a 200 μM (60 ppm) —concentración mayor a la del presente experimento— detuvo el crecimiento de raíces, produciendo el amarillamiento de las hojas (clorosis), afectación similar a la detectada la presente investigación.

El cromo está reportado como un metal muy tóxico para las plántulas, que causa deficiencia en la absorción de metales y nutrientes del suelo y su posterior transporte y así lo evidencia la literatura científica. Por ejemplo, en el caso de *Pistia stratiotes* la exposición de cromo causó un efecto tóxico de inhibición del crecimiento, elongación y estructura anómala de la raíz (Mufarrege y cols., 2010); mientras que en la especie *Cicer arietinum*, la exposición al cromo causó una disminución gradual

de la longitud de la raíz mientras se iba incrementando la concentración de 20 a 100 ppm (Medda y Kumar Mondal, 2017).

El área de la raíz (Figura 6A) y la longitud total de la raíz (Figura 7A), se incrementaron ligeramente ante la presencia de plomo, sin diferencias significativas entre los tratamientos (incluyendo el control), lo que confirma la alta tolerancia de *T. latifolia* al plomo y ratifica el uso ecológico que se le da a esta planta, como es la remoción de nutrientes y contaminantes en sistemas naturales o artificiales de tratamiento de aguas.

Por otra parte, la presencia de concentraciones de cromo detuvo el crecimiento de las plántulas en el rizotrófon a lo largo de los 15 días de evaluación, ocasionando que el área total de la raíz (Figura 6B) y su longitud total (Figura 7B) permanecieran constantes. El tratamiento control, mientras tanto, presentó un incremento significativo del área de la raíz, lo que demuestra que el crecimiento es normal cuando el cromo no está presente en la solución nutritiva.

En el presente estudio se pudo evidenciar que tanto la germinación de las semillas de *T. latifolia* como el crecimiento del sistema radical de las plántulas expuestas al plomo, presentaron germinación y crecimiento, por lo que se pueden considerar tolerantes, al menos para estos dos aspectos, permitiéndoles sobrevivir en ambientes contaminados por este metal pesado (Branković y cols., 2011). Las semillas y plántulas expuestas a cromo fueron menos tolerantes (en la germinación y el crecimiento radical), sin embargo, esta tolerancia podría incrementar cuando las plantas se desarrollen en ambientes con mayores concentraciones de cromo (tolerancia por aclimatación). Las características mencionadas de *T. latifolia* brindan a esta especie los atributos para ser usada en sistemas de tratamiento de remediación ambiental de aguas contaminadas.

4 Conclusiones

La aplicación de algunos tratamientos pregerminativos aumenta significativamente el porcentaje de germinación en comparación con las semillas colocadas simplemente en agua destilada. Se asume que las poblaciones de *Typha latifolia* pertenecen a

una misma población ecológica por su porcentaje de germinación con los tratamientos aplicados. Asimismo, la exposición a plomo y cromo causa una disminución del porcentaje de germinación, especialmente este último.

El uso sistemático de rizotrones permitió evidenciar el desarrollo secuencial de la raíz fuera de su hábitat natural y controlar variables para el análisis. Las concentraciones de metales a los que fueron expuestas las plantas no evidenciaron cambios en el número de las raíces y longitud de estas, sin embargo, la exposición al cromo sí afectó el área total de las raíces de esta especie con respecto al control, lo que causó la muerte de varias plántulas, probablemente al ver reducida su área radical en procesos como absorción de agua y nutrientes.

Agradecimientos

Al personal del Laboratorio de Fisiología Vegetal de la Universidad de La Habana, y a la Universidad Técnica del Norte.

Contribución de los autores

M.A.G.: Conceptualización, análisis formal, investigación, metodología, visualización, escritura – borrador original, escritura – revisión y edición. **A.V.S.:** Conceptualización, análisis formal, investigación, metodología, visualización, escritura – borrador original, escritura – revisión y edición. **V.P.V.:** Conceptualización, análisis formal, metodología, visualización, escritura – borrador original, escritura – revisión y edición.

Referencias

Armengaud, P., Zambaux, K., Hills, A., Sulpice, R., Pattison, R. J., Blatt, M. R., y Amtmann, A. (2009). Ez-rhizo: Integrated software for the fast and accurate measurement of root system architecture. *Plant Journal*, 57(5), 945–956. Online: <https://h7.cl/1nP4q>

Baligar, V. C., Fageria, N. K., y Elrashidi, M. A. (1998). Toxicity and nutrient constraints on root growth. *HortScience*, 33(6), 960–965. Online: <https://h7.cl/1nP4t>

Barceló, J., y Poschenrieder, C. (1992, January). Respuestas de las plantas a los contaminantes: “la fitorremediación”. *Suelo y Planta*, 2, 345–361. Online: <https://h7.cl/1nP4a>

Baskin, C. C., y Baskin, J. M. (2014). *Seeds: Ecology, biogeography, and evolution of dormancy and germination*. Academic Press.

Bourgeois, B., Hugron, S., y Poulin, M. (2012). Establishing a moss cover inhibits the germination of *Typha latifolia*, an invasive species, in restored peatlands. *Aquatic Botany*, 100, 76–79. Online: <https://h7.cl/1iOuV>

Branković, S., Pavlović-Muratspahić, D., Topuzović, M., Glišić, R., Banković, D., y Stanković, M. (2011). Environmental study of some metals on several aquatic macrophytes. *African Journal of Biotechnology*, 10(56), 11956–11965. Online: <https://h7.cl/1iOv0>

Breckle, S.-W., y Kahle, H. (1992). Effects of toxic heavy metals (cd, pb) on growth and mineral nutrition of beech (*Fagus sylvatica* l.). *Vegetatio*, 101, 43–53. Online: <https://h7.cl/1iOv6>

Busch, J., Mendelssohn, I. A., Lorenzen, B., Brix, H., y Miao, S. (2006). A rhizotron to study root growth under flooded conditions tested with two wetland cyperaceae. *Flora: Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 201(6), 429–439. Online: <https://h7.cl/1iOv7>

Buta, E., Paulette, L., Mihăiescu, T., Buta, M., y Cantor, M. (2011). The influence of heavy metals on growth and development of *Eichhornia crassipes* species, cultivated in contaminated water. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 39(2), 135–141. Online: <https://h7.cl/1nP4O>

Chen, Y.-L., Hong, X.-Q., He, H., Luo, H.-W., Qian, T.-T., Li, R.-Z., ... Yu, H.-Q. (2014). Biosorption of cr (vi) by *Typha angustifolia*: Mechanism and responses to heavy metal stress. *Bioresource Technology*, 160, 89–92. Online: <https://h7.cl/1nP4S>

Cheng, W., Zhang, G., Yao, H., y Zhang, H. (2008). Genotypic difference of germination and early seedling growth in response to cd stress and its relation to cd accumulation. *Journal of Plant Nutrition*, 31(4), 702–715. Online: <https://h7.cl/1iOvh>

- Franco, J. A., Bañón, S., Vicente, M. J., Miralles, J., y Martínez-Sánchez, J. J. (2011). Root development in horticultural plants grown under abiotic stress conditions - a review. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 86(6), 543–556. Online: <https://h7.cl/1iOvm>
- Gautam, M., Sengar, R. S., Chaudhary, R., Sengar, K., y Garg, S. (2010). Possible cause of inhibition of seed germination in two rice cultivars by heavy metals pb²⁺ and hg²⁺. *Toxicological and Environmental Chemistry*, 92(6), 1111–1119. Online: <https://h7.cl/1nP50>
- Gratani, L. (2014). Plant phenotypic plasticity in response to environmental factors. *Advances in Botany*, 2014, 1–17. Online: <https://h7.cl/1iOvt>
- Han, J., Chen, F., Zhou, Y., y Wang, C. (2015). High pb concentration stress on *Typha latifolia* growth and pb removal in microcosm wetlands. *Water Science and Technology*, 71(11), 1734–1741. Online: <https://h7.cl/1iOvw>
- Hoagland, D. R., y Arnon, D. I. (1938). Preparing the nutrient solution. *The Water-Culture Method for Growing Plants Without Soil*, 347, 29–31.
- Kahle, H. (1993). Response of roots of trees to heavy metals. *Environmental and Experimental Botany*, 33(1), 99–119. Online: <https://h7.cl/1iOvE>
- Kumar Yadav, V., Santos-González, J., y Köhler, C. (2021). Int-hi-c reveals distinct chromatin architecture in endosperm and leaf tissues of *Arabidopsis*. *Nucleic Acids Research*, 49(8), 4371–4385. Online: <https://h7.cl/1nP5k>
- Lobet, G., Pagès, L., y Draye, X. (2011). A novel image-analysis toolbox enabling quantitative analysis of root system architecture. *Plant Physiology*, 157(1), 29–39. Online: <https://h7.cl/1iOvM>
- Lorenzen, B., Tinerella, P. P., Newman, S., y Steward, K. K. (2000). Seed germination of two everglades species, *Cladium jamaicense* and *Typha domingensis*. *Aquatic Botany*, 66(3), 169–180. Online: <https://h7.cl/1iOvU>
- Martínez-Trujillo, M., Cárdenas-González, J. F., González-Morales, S., y Flores-Hernández, A. (2013). Respuestas morfogénicas de las raíces de *Arabidopsis thaliana* al estrés de cr(vi). *Revista Chilena de Historia Natural*, 86, 207–219. Online: <https://h7.cl/1iOvZ>
- Medda, S., y Kumar Mondal, N. (2017). Chromium toxicity and ultrastructural deformation of *Cicer arietinum* with special reference of root elongation and coleoptile growth. *Annals of Agrarian Science*, 15(3), 396–401. Online: <https://h7.cl/1iOw2>
- Mufarrege, M. M., Hadad, H. R., y Maine, M. A. (2010). Response of *Pistia stratiotes* to heavy metals (cr, ni, and zn) and phosphorous. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 58(1), 53–61. Online: <https://h7.cl/1iOwh>
- Nas, F., y Ali, M. (2018). The effect of lead on plants in terms of growing and biochemical parameters: A review. *MOJ Ecology & Environmental Sciences*, 3(4), 265–268. Online: <https://h7.cl/1nP62>
- Nishihiro, J., Teramura, A., Hosomi, M., y Nakagawa, M. (2004). Germination characteristics of lakeshore plants under an artificially stabilized water regime. *Aquatic Botany*, 79(4), 333–343. Online: <https://h7.cl/1iOwI>
- Oquendo, R., Fernández, L., y Pérez, L. (2020). Concentración de plomo y cromo en poblaciones de *Typha latifolia* L. (typhaceae) en el lago yahuarcocha; imbabura. *Revista Cubana de Ciencias Biológicas*, 8, 1–12. Online: <https://h7.cl/1iOwR>
- Ortiz-Castro, R., Contreras-Cornejo, H. A., Macías-Rodríguez, L., y López-Bucio, J. (2007). Effects of dichromate on growth and root system architecture of *Arabidopsis thaliana* seedlings. *Plant Science*, 172(4), 684–691. Online: <https://h7.cl/1nP6B>
- Pal Singh, H., Du, J., y Verma, S. K. (2013). Chromium toxicity and tolerance in plants. *Environmental Chemistry Letters*, 11(3), 229–254. Online: <https://h7.cl/1iOwZ>
- Pan, X. B., Zhu, C., y Cheng, C. (2008). Assessment of techniques for screening alfalfa cultivars for aluminum tolerance. *Euphytica*, 164(2), 541–549. Online: <https://h7.cl/1iOx0>
- Pandey, S. N., Nautiyal, B. D., y Sharma, C. P. (2008). Pollution level in distillery effluent and its phytotoxic effect on seed germination and early growth of maize and rice. *Journal of Environmental Biology*, 29(2), 267–270. Online: <https://h7.cl/1iOx5>
- Rout, G. R., Samantaray, S., y Das, P. (2000). Effects of chromium and nickel on germination and growth in tolerant and non-tolerant populations of *Echinochloa*. *Chemosphere*, 40, 855–859. Online: <https://h7.cl/1nP6N>

- Royal Botanical Gardens, Kew. (2016). *Seed information database*. Online: <http://data.kew.org/sid/>
- Sasmaz, A., Obek, E., y Hasar, H. (2008). The accumulation of heavy metals in *Typha latifolia* grown in a stream carrying secondary effluent. *Ecological Engineering*, 33(3-4), 278–284. Online: <https://h7.cl/1nP6T>
- Semenova, A. (2014). *Method for producing aquatic plants for the purification of contaminated water* (EP: PCT n.º WO131930 A1).
- Sharma, A., Singh, H., Kaur, N., Singh, N., Singh, P., y Bhardwaj, R. (2022). Heavy metal induced regulation of plant biology: Recent insights. *Physiologia Plantarum*, 174(e13688). Online: <https://h7.cl/1nP6Z>
- Smith, P. P. (2018). *The book of seeds: A life-size guide to six hundred species from around the world*. The University of Chicago Press.
- Stewart, H., Miao, S. L., Colbert, M., y Carraher, C. E. (1997). Seed germination of two cattail (*Typha*) species as a function of everglades nutrient levels. *Wetlands*, 17, 116–122. Online: <https://h7.cl/1nP72>
- USDA. (2016). *Plants database | usda plants guide*. Online: <http://plants.usda.gov/java/>
- Yongpisanphop, J., Kruatrachue, M., y Pokethitiyook, P. (2005). Toxicity and accumulation of lead and chromium in *Hydrocotyle umbellata*. *Journal of Environmental Biology*, 26(1), 79–89. Online: <https://h7.cl/1iOxs>
- Zaidi, A., Ahmad-Wani, P., y Saghir-Khan, M. (2012). *Toxicity of heavy metals to legumes and bioremediation*. Springer.
- Zaranyika, M. F., y Nyati, W. (2017). Uptake of heavy metals by *Typha capensis* from wetland sites polluted by effluent from mineral processing plants: implications of metal–metal interactions. *3 Biotech*, 7(5), 1–11. Online: <https://h7.cl/1nP7a>
- Zhang, G. (2015). Influence of heavy metal wastewater on seed germination of different wetland plants. *Journal of China Agricultural University*, 20, 167–178. Online: <https://h7.cl/1nP7c>
- Zulfiqar, U., Farooq, M., Hussain, S., Maqsood, M., Hussain, M., Ishfaq, M., ... Anjum, M. Z. (2019). Lead toxicity in plants: impacts and remediation. *Journal of Environmental Management*, 250, 109557. Online: <https://h7.cl/1nP7j>



VALORIZACIÓN DE LA CÁSCARA DE BANANO (*MUSA PARADISIACA*) COMO MATERIA PRIMA PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOPOLÍMEROS

VALORIZATION OF BANANA PEEL (*MUSA PARADISIACA*) AS A RAW MATERIAL FOR BIOPOLYMER PRODUCTION

Jimena Taco *, Ronald Jiménez y Maria Soto

Instituto Superior Tecnológico Tsáchila. [<https://ror.org/03fnk5526>]

*Autor para correspondencia: jimenataco@tsachila.edu.ec

Manuscrito recibido el 10 de agosto de 2022. Aceptado, tras revisión el 12 de diciembre de 2022. Publicado el 1 de marzo de 2026.

Resumen

El uso de materiales plásticos y sus efectos negativos en la sociedad ha incrementado los estudios acerca de biomateriales como material sustituto. Durante la presente investigación se desarrolló una biopelícula obtenida a partir de cáscara de plátano (PBCP) y posteriormente se evaluaron varias propiedades. Mediante centrifugado se extrajo pulverizado de plátano variando el número de revoluciones por minuto (rpm) 900, 1500 y 3000. Para la formación de la PBCP se utilizó glicerol en concentraciones de 30% y 50%, adicionalmente se controlaron las temperaturas de calentamiento en 70, 80, y 90 °C. Los resultados mostraron que debido a la baja cantidad proteica del pulverizado de plátano los tratamientos no muestran desnaturalización térmica, y los tratamientos sometidos a 3000 rpm y 90 °C muestran mayores valores de viscosidad (57570 Pa·s). Por el contrario, en el análisis de cinética de absorción de humedad se determinó que las variables de temperatura y de rpm no influyen en los resultados obtenidos; no obstante, mientras mayor es el porcentaje de glicerol en la película, mayor es la tasa de absorción de humedad pasando de $(3,1 \times 10^{-10}$ a $3,7 \times 10^{-10})$ cm²/s y de $(3,9 \times 10^{-10}$ a $4,9 \times 10^{-10})$ cm²/s, respectivamente. En la permeabilidad de vapor de agua se evidencia una diferencia significativa en los niveles de glicerol. Los valores de PVA de las PBCP en las diferentes condiciones oscilaron entre (2,8 a 5,0) g·mm/(kPa·h·m²). Por lo expuesto anteriormente se determina que es posible realizar PBCP y para mejorar los resultados de viscosidad se recomienda usar un emulsionante para evitar la reaglomeración de las moléculas.

Palabras clave: Biodegradabilidad, biopolímero, plastificante, producción, reología.

Abstract

The use of plastic materials and their negative effects on society has increased the studies about biomaterials as substitute material; during the present research, a biofilm obtained from banana peel (PBCP) was developed and subsequently several properties were evaluated. By means of centrifugation, banana pulverized was extracted by varying the number of revolutions per minute (rpm) 900, 1500, and 3000. Glycerol was used for the formation of PBCP at concentrations of 30% and 50%; additionally, the heating temperatures were controlled at 70, 80, and 90 °C. The results showed that due to the low protein content of the banana pulverized, the treatments did not show thermal denaturation; the treatments subjected to 3000 rpm and 90 °C denoted higher viscosity values (57570 Pa·s). On the other hand, in the analysis of moisture absorption kinetics, it was determined that the temperature and rpm variables do not influence the results obtained; however, the higher the percentage of glycerol in the film, the higher the rate of moisture absorption, going from $(3.1 \times 10^{-10}$ to $3.7 \times 10^{-10})$ cm²/s and $(3.9 \times 10^{-10}$ to $4.9 \times 10^{-10})$ cm²/s, respectively. In the water vapor permeability, a significant difference in the levels of glycerol is evidenced; the PVA values of the PBCP in the different conditions ranged between (2.8 to 5.0) g·mm/(kPa·h·m²). From the above, it is determined that it is possible to perform PBCP, and to improve the viscosity results it is recommended to use an emulsifier to avoid the reagglomeration of the molecules.

Keywords: Biodegradability, biopolymer, plasticizer, production, rheology.

Forma sugerida de citar: Taco, J., Jiménez, R. y Soto, M. (2026). Valorización de la cáscara de banano (*Musa paradisiaca*) como materia prima para la producción de biopolímeros. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*. Vol. 43(1):166-177. <https://doi.org/10.17163/lgr.n43.2026.09>.

Orcid IDs:

Jimena Taco: <https://orcid.org/0000-0002-2700-2351>

Ronald Jiménez : <https://orcid.org/0000-0002-7853-7540>

Maria Soto: <https://orcid.org/0000-0002-6196-6920>

1 Introducción

Los mercados globalizados y las exigencias de los consumidores por productos de calidad, no solo higiénico-sanitarios sino amigables con el ambiente, han llevado a la industria de alimentos a un cambio de paradigma de producción a fin de adaptarse a las necesidades de sus clientes (Ramos y cols., 2020). Una de las estrategias que la agroindustria usa para cumplir este propósito es la producción más limpia (PML), que permite el reciclaje interno o externo de los residuos para aumentar la eficiencia en los procesos y reducir riesgos ambientales (Hoof y cols., 2018; Lucero-Murillo y cols., 2026).

Otra problemática relacionada con la producción y consumo de alimentos es el uso progresivo de empaques desechables que, pese a sus ventajas como precio económico, resistencia a la oxidación, especificidad de función y versatilidad, causa grave impacto al medio ambiente (Mejía Osorio, 2020). Además, según Tuárez y cols. (2022), los aditivos adicionados para mejorar las propiedades funcionales de los polímeros usados en envases migran a los alimentos, generando potenciales riesgos en la salud humana. En este contexto, actualmente los investigadores trabajan en la búsqueda de sustitutos de empaques no biodegradables, y los esfuerzos combinados han dado como resultado la obtención de empaques biodegradables que se producen a partir de los biopolímeros (Ospina, 2015).

Por otra parte, la escala de desechos es amplia en el sector agrícola; por ejemplo, los residuos de cultivos y los desechos de las plantas que permanecen en el campo posterior a la cosecha (Mikus y Galus, 2022). Por ello, los principales biopolímeros degradables usados para el desarrollo de películas comestibles, recubrimientos, envases y empaques de alimentos son los polisacáridos, con especial énfasis a los derivados de residuos orgánicos (Eixenberger y cols., 2022).

Por ejemplo, Taghavi Kevij y cols. (2021) desarrollaron películas comestibles funcionales utilizando gelatina y diferentes concentraciones (0, 3, 6, 9, 12 y 15)% de pulverizado de cáscara de naranja (PCN). El espesor, el porcentaje de humedad y la permeabilidad al vapor de agua de las películas de la gelatina incrementaron a medida que aumentaba el contenido de PCN en la formulación. Las películas con

mayor contenido de PCN mostraron mayor resistencia y menor elongación. Además, sus resultados demuestran que el contenido de antioxidantes, especialmente de compuestos fenólicos, mejoró significativamente al incorporar PCN. En cuanto a la actividad antimicrobiana de las películas de gelatina contra *Staphylococcus aureus* y *Escherichia coli*, mejoró en películas con mayor incorporación de PCN. Por los resultados anteriormente descritos se evidencia que la piel de naranja tiene un potencial para producir biopelículas.

Otra investigación referente al tema la desarrolló Dao y cols. (2022), en la cual se extrajo pectina de las cerezas de café, la cual, pese a formar aproximadamente el 50% de la pulpa de café no es aprovechada, convirtiéndose en uno de los desechos agrícolas más abundantes en la industria de alimentos. La variedad seleccionada para esta investigación fue *Coffea arabica* L., del cual se utilizó el método ecológico para obtener pectina y celulosa. Los resultados evidenciaron que el procedimiento de extracción con solvente acidificado a un pH de 3,1 y a 84,3 °C durante 4,3 h permite recuperar 16,7% de pectina de las pulpas de café. Por otro lado, si se aplica un procedimiento de dos pasos que incluye un pretratamiento con vapor a 170 °C durante 30 min y un blanqueo utilizando H₂O₂ a 40 °C durante 10 h, contribuye a obtener el 54% de rendimiento de celulosa de pulpas de café. Las biopelículas que se obtuvieron a partir de mezclas de pectina de café y celulosa microcristalina presentaron una superficie lisa, transparencia elevada, resistencia a la tracción de 3 MPa y alargamiento del 4%.

Con base a lo anteriormente expuesto se ha definido que es posible obtener biopolímeros a partir de desechos orgánicos, y considerando la alta producción de plátano en el Ecuador (Pacheco y cols., 2021), se seleccionó la cáscara de plátano (*Musa paradisiaca*) para esta investigación que plantea como objetivo el desarrollo y evaluación de un biopolímero a partir de un residuo de la industria de alimentos.

2 Materiales y Métodos

2.1 Obtención del almidón de cáscara de plátano

El residuo orgánico seleccionado para la investigación fue la cáscara de plátano debido a su al-

to contenido de carbohidratos (Anhwange y cols., 2009). Para lo cual la cáscara de plátano se obtuvo en la ciudad de Santo Domingo – Ecuador, recolectadas de varios comerciantes que se dedican a la elaboración y expendio de chifles. Luego se lavaron cuidadosamente con agua tibia para eliminar todos los materiales extraños, se rebanaron y picaron. Una vez finalizado el pretratamiento se realizó una hidrólisis ácida utilizando ácido clorhídrico. Posteriormente, se agregó agua desionizada a un vaso de precipitados que contenía la pulpa hidrolizada, dejando reposar durante unas 8 horas.

El proceso de extracción se llevó a cabo utilizando una centrífuga (DM0412P con capacidad de 100 a 4500 rpm), seleccionando 3 niveles de rpm (900, 1500, 3000) según la investigación de Altemimi (2018) quien además estandarizó el tiempo de centrifugación en 15 minutos. Las muestras centrifugadas se filtraron a través de un tamiz de 180 μm . A continuación, se dejó sedimentar el filtrado y se añadió sosa cáustica para separar el contenido de proteínas del almidón e igualmente para neutralizar la acidez del almidón restante. Después de esto, se agregó agua desionizada varias veces para eliminar el exceso de sosa cáustica mediante un proceso de lavado.

El almidón húmedo resultante se secó en un deshidratador de bandejas (DESHI 10); la temperatura de secado se estandarizó a 55 °C durante 6 h con base a la investigación de Juárez Chunga (2022), luego se pulverizó (PULVERIZER 10, motor de 1,5 HP) hasta que el 95% del pulverizado pasara por un tamiz de 120 μm , según la norma técnica ecuatoriana para harina de trigo NTE INEN 612 (NTE INEN 612, 2006). Seguidamente se almacenó el pulverizado empacado al vacío para mantener el 10% de humedad.

2.2 Preparación de película biopolimérica de la cáscara de plátano (PBCP)

La preparación de las películas biopoliméricas de la cáscara de plátano (PBCP) se llevó a cabo en condiciones atmosféricas. Según el método usado por Kim y Min (2012), la solución formada por el pulverizado extraído a diferentes rpm (900, 1500, 3000) y el 30% o 50% (p/p) de glicerol se calentó a 70, 80 o 90 °C durante 45 minutos. Las películas se moldearon pipeteando la mezcla sobre placas de teflón (14 cm \times 10 cm) que descansaban sobre una super-

ficie nivelada de cerámica; la cantidad de solución formadora de película se seleccionó para producir películas con espesor entre 0,2 a 0,3 mm. Transcurrida una hora, la película se colocó en una cámara de temperatura/humedad $23 \pm 2^\circ\text{C}$ y 50% HR durante 48 horas.

2.3 Análisis de reología

Las propiedades reológicas de las películas se determinaron siguiendo el método de Hendrix y cols. (2012) utilizando un reómetro rotacional (RheolabQC) y una placa paralela de acero inoxidable (304) de 45 mm. Las soluciones formadoras de película se depositaron en una placa Peltier, se colocó agua desionizada en la trampa de disolvente y se extendió una capa de aceite en los bordes exteriores de las suspensiones para limitar la evaporación del agua.

Se determinaron los módulos elásticos (G') y la viscosidad (G'') mientras se elevaba gradualmente la temperatura desde 20 °C hasta 90 °C con una velocidad de rampa de 1 °C/min. Todas las mediciones fueron realizadas en condiciones de frecuencia de 1 rad/s y deformación del 2%.

2.4 Análisis de cinética de absorción de humedad

Se aplicó el método de Talja, Helen, y cols. (2008) con algunas modificaciones. Las muestras de película se prepararon con medidas de 5 cm por 15 cm, manteniendo un espesor de $0,2 \pm 0,03$ mm, las cuales posteriormente fueron sometidas a $45 \pm 2^\circ\text{C}$ en horno secador sobre gel de sílice hasta que las muestras mantuvieron un peso constante. A continuación, se acondicionaron a $23 \pm 2^\circ\text{C}$ en un desecador con solución saturada de nitrato de potasio para garantizar HR del 94%. Paso seguido se calculó la absorción de humedad (AH) mediante la siguiente fórmula:

$$AH(\%) = \frac{W_t - W_o}{W_o} \times 100 \quad (1)$$

Donde W_o y W_t fueron los pesos de las muestras secas y las muestras en el tiempo t , respectivamente. Posteriormente, según el método de Talja, Peura, y cols. (2008) se calculó el coeficiente de difusión (D) para el agua en las muestras de película, a partir de

la pendiente de W_t/W_α mediante la siguiente ecuación:

$$D = \sqrt{\frac{t}{L^2}} \times \frac{W_t}{W_0} \times 0,6 \quad (2)$$

Donde L es la mitad del espesor de la película y W_α es el peso del agua absorbida en el equilibrio.

2.5 Permeabilidad al vapor de agua

La permeabilidad al vapor de agua (PVA) de la película se midió según el método E96-92 de la Sociedad Americana de Pruebas y Materiales (McHugh y Krochta, 1994). Brevemente, se agregaron 6 mL de agua destilada a una copa de muestra de poliacrilato de metilo (diámetro interno: 46 mm, diámetro externo: 87 mm, longitud: 21 mm), y se cubrió herméticamente la copa con la película de biopolímero de cáscara de plátano (PBCP). Las copas de muestra se colocaron en una cámara estática de temperatura $23 \pm 2^\circ\text{C}$ equipada con ventiladores ajustados a una velocidad de aire de 152 m/min. Adicionalmente, la HR se registró con un higrómetro (Modelo THDx).

2.6 Prueba de biodegradabilidad

La biodegradabilidad de las películas de biopolímeros se realizó a temperatura ambiente con una duración de 30 días de acuerdo con el procedimiento aplicado por Iguardia (2013). Las pruebas aplicadas fueron degradabilidad en intemperie y degradabilidad por agua de río.

Para el primer ensayo se procedió a pesar las muestras y colocarlas en recipientes de vidrio sin tapa para que reposaran al aire libre por 30 días. Para la prueba de biodegradabilidad por agua se pesaron las muestras y se sumergieron en un recipiente de vidrio con agua, se taparon los recipientes y se dejaron en reposo por 30 días. Transcurrido el tiempo en ambos ensayos se pesaron las muestras y se procedió a calcular el porcentaje de biodegradabilidad mediante la Ecuación 3.

$$\% \text{ Degradabilidad} = 100 - \left(\frac{\text{Peso final}}{\text{Peso inicial}} \times 100 \right) \quad (3)$$

2.7 Análisis estadístico

Todas las medidas se calcularon utilizando el promedio de los tres valores. Los factores de tratamien-

to en este trabajo fueron: factor A con los diferentes rpm (900, 1500, 3000) a las cuales se obtuvo el pulverizado de cáscara de plátano; factor B al 30% o 50% (p/p) de glicerol añadido en la formulación; factor C la temperatura de calentamiento de la película 80, 90 y 100°C , por lo que se aplicó un diseño completamente al azar con arreglo factorial $A \times B \times C$, con 18 tratamientos y 3 repeticiones, cada uno arrojando un total de 54 unidades experimentales.

3 Resultados y Discusión

3.1 Análisis de reología

Para el análisis, la temperatura inicial de las suspensiones fue de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ y las temperaturas durante las pruebas reológicas oscilaron entre 20°C a 90°C , con rangos de temperatura aumentada (ΔT) de 20 ± 1 , 25 ± 2 y $\pm 25^\circ\text{C}$ y un tiempo aproximado de 50 segundos.

Los valores G' de las suspensiones de PBCP homogeneizadas a 1 atm se presentan en la Figura 1. Los valores de G' disminuyeron a medida que la temperatura aumentaba de 20°C hasta llegar a 90°C . La temperatura modifica la distribución de tamaños de los agregados/partículas de biopolímeros, así como la estructura de agregación (Sanchez y cols., 1999). Las suspensiones formuladas a partir del almidón centrifugado a 3000 rpm exhibieron valores de G' más altos que los otros tratamientos. Al respecto, Tatirat y Charoenrein (2011) mencionan que la hidrólisis ácida y la centrifugación acelerada pueden provocar la descomposición de los biopolímeros.

El patrón descendente de los valores de G' para las suspensiones podría explicarse por la pérdida de estructura de red dentro de los polímeros de PBCP. Un mayor número de rpm en el proceso de extracción del biopolímero de la cáscara del plátano puede dar como resultado la pérdida de la red de biopolímero y consecuentemente una disminución, debido al alto potencial de energía. Sin embargo, las tasas de disminución de las suspensiones tratadas con 900, 1500 y 3000 rpm fueron relativamente pequeñas (Figura 1) y presentan mejores resultados de G' con un 30% de glicerol.

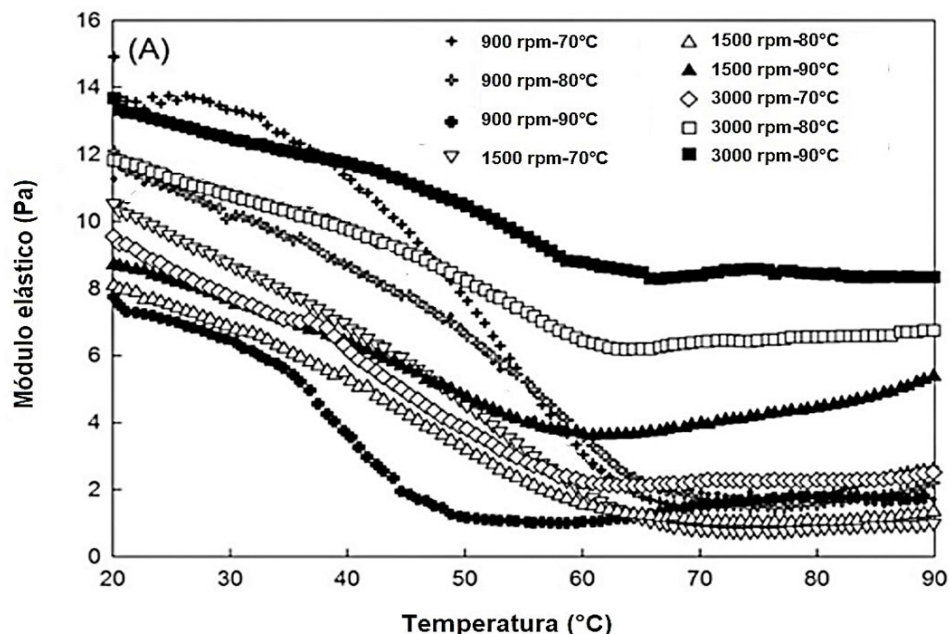


Figura 1. Módulo elástico (G') de las suspensiones filmógenas preparadas con pulverizado centrifugado de diferentes revoluciones por minuto (900, 1500, 3000) y calentado a diferentes temperaturas de 70, 80, 90 $^{\circ}\text{C}$.

Según lo manifestado por Sanchez y cols. (1999) y posteriormente por Hendrix y cols. (2012), la reagrupación de las pequeñas partículas ralentizó la tasa de pérdida de la red de biopolímeros debido a que inmediatamente después del tratamiento, los biopolímeros en las suspensiones homogeneizadas fueron muy pequeños. Sin embargo, estas pequeñas partículas de biopolímero podrían reagruparse rápidamente y formar redes a través de enlaces de hidrógeno, interacciones hidrofóbicas e interacciones carga-carga, especialmente si el plastificante utilizado es el glicerol.

En el presente estudio, la temperatura de prueba de reología aumentó gradualmente de 20 $^{\circ}\text{C}$ a 90 $^{\circ}\text{C}$; se seleccionó este rango de temperaturas porque las PBCP se calientan a esta temperatura durante la preparación. El calentamiento puede causar la desnaturalización de las proteínas en las suspensiones, aumentando las interacciones proteína-proteína y reduciendo la movilidad segmentaria de las mismas (Pérez-Gago, 2012). Sin embargo, la influencia de la desnaturalización de la proteína, que normalmente ocurre a altas temperaturas manifestándose con un aumento de G' , no se observó en el presente experimento de reología y esto podría deberse

a una baja concentración de proteína ($\sim 0,43\%$) en la suspensión. Los resultados sugieren que calentar las muestras entre 70 $^{\circ}\text{C}$ a 90 $^{\circ}\text{C}$ durante 45 min puede incitar la desnaturalización térmica de las proteínas en las suspensiones filmógenas, pero en esta experimentación no fue difícil obtener las propiedades físicas que se esperan.

Los valores de G' para todas las suspensiones se mantuvieron relativamente constantes entre 4 a 8 Pa en todo el rango de temperatura evaluado. Se reportaron resultados similares por Sablani y cols. (2009) y Hendrix y cols. (2012) durante estudios previos para la formación de películas, utilizando suspensiones de biopolímeros de cáscaras de manzana y harina de mostaza desgrasada, respectivamente.

Respecto a las suspensiones elaboradas con pulverizado a 3000 rpm y a temperatura de homogenización de película de 90 $^{\circ}\text{C}$, estas presentaron valores de viscosidad superiores a los demás tratamientos (Figura 2). Por otra parte, las suspensiones trabajadas a 1500 rpm con 90 $^{\circ}\text{C}$ tienen un perfil de viscosidad semejante a las elaboradas a 3000 rpm y 90 $^{\circ}\text{C}$; no obstante, la medida de la viscosidad fue significativamente mayor en estas últimas suspensiones.

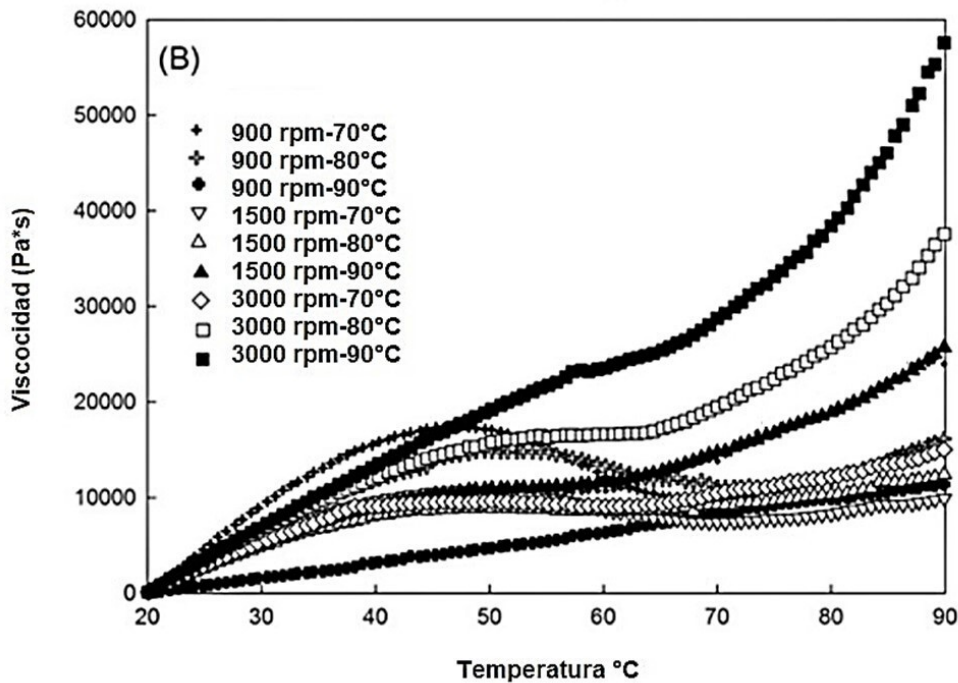


Figura 2. Viscosidad (G'') de las suspensiones filmógenas preparadas con pulverizado centrifugado de diferentes revoluciones por minuto (900, 1500, 3000) y calentado a diferentes temperaturas de 70, 80, 90 °C.

Además, en el análisis se evidencia que mientras más alta es la temperatura del ensayo, mayor es la viscosidad de las muestras. Se obtuvo la viscosidad 57 570 Pa·s en las suspensiones sometidas a temperatura de 90 °C, siendo el mayor valor presentado. Esto podría deberse a aumentos en la reticulación intermolecular entre los polímeros como la celulosa presente en la PBCP en temperaturas bajas, lo que da como resultado la formación de un gel (Coma y cols., 2003).

3.2 Análisis de cinética de absorción de humedad

En cuanto a los resultados sobre absorción de agua, las muestras acondicionadas a 94% HR y 23 °C en función del tiempo (Figura 3) revelan que la absorción de agua fue mayor en las PBCP que contenían 50% de glicerol, es decir, estas películas presentan un mayor rango de hidratación. La inclusión de moléculas de glicerol polares e hidrofílicas, que pueden actuar como centros hidrofílicos fuertes que se unen fácilmente y con fuerza al agua, probablemente da-

rá como resultado un aumento en la hidrofilia en la superficie y facilitará la absorción de moléculas de agua (Kang y cols., 2015).

Además, las características polares e hidrofílicas semejantes de las moléculas de agua y las matrices de la película de biopolímero pueden conducir a una fuerte cohesión entre las moléculas y las matrices debido a los enlaces de hidrógeno (Kang y cols., 2015).

Los resultados de absorción de agua se vieron fuertemente afectados por la concentración de glicerol, pero no por los parámetros de temperatura de calentamiento y número de rpm de centrifugación previa a la obtención del pulverizado (Figura 3). Este hallazgo está de acuerdo con un estudio anterior que demostró que la absorción de agua de las películas de biopolímero hechas de cáscaras de manzana no estuvo afectada por niveles variados de presión HPH (138–207 MPa) ni temperatura (Sablani y cols., 2009).

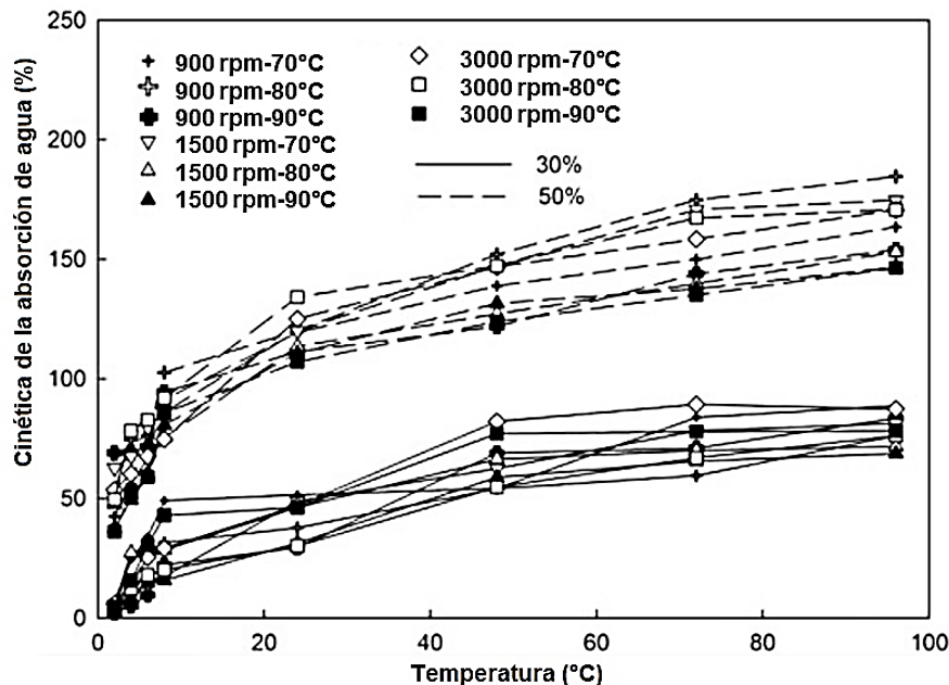


Figura 3. Cinética de la absorción de agua de películas a base de cáscara de plátano plastificadas con glicerol formadas a partir de las suspensiones filmógenas.

Los valores D para las películas estudiadas acondicionadas al 94% de HR que contenían 30% y 50% de glicerol fueron de $3,1 \times 10^{-10}$ a $3,7 \times 10^{-10}$ cm^2/s y de $3,9 \times 10^{-10}$ a $4,9 \times 10^{-10}$ cm^2/s , respectivamente. El volumen disponible para la expansión de moléculas de agua en la matriz de la película aumenta a medida que incrementa la cantidad de glicerol como plastificante. Los presentes hallazgos indican que las películas de PBCP se pueden formular para proporcionar una tasa de migración de humedad deseada cambiando la cantidad de glicerol.

Se compararon los valores D calculados en esta investigación con los de otras investigaciones en las cuales se desarrollaron películas de biopolímeros, por ejemplo, las películas basadas en cáscara de manzana ($0,82\text{--}2,62 \times 10^{-10}$ cm^2/s) realizada por Sablani y cols. (2009), pero estos valores son inferiores a las de las películas de celulosa microfibrilada ($6,8 \times 10^{-10}$ cm^2/s) desarrollada por Minelli y cols. (2010), o a los datos $12,6\text{--}31,8 \times 10^{-10}$ cm^2/s presentados por Taghavi Kevij y cols. (2021) en una película de queratina, que también difieren con los valores D $36,3 \times 10^{-10}$ cm^2/s calculados en películas de almidón de amilosa en la investigación de Muscat y

cols. (2014).

3.3 Prueba de permeabilidad al vapor de agua

Los resultados de PVA de las películas se muestran en la Tabla 1.

Los espesores de las películas que contenían 30% y 50% de glicerol fueron de $0,2 \pm 0,03$ mm y no difirieron significativamente ($p > 0,05$). La PVA fue generalmente más alta en películas con 50% de glicerol (Tabla 1); esto podría explicarse debido a que la transmisión de vapor de agua a través de una película hidrófila depende tanto de la difusividad como de la solubilidad de las moléculas de agua en la matriz de la película (Pak y cols., 2020).

La mayor PVA en las películas con 50% de glicerol en comparación con aquellas con 30% de glicerol puede ser el resultado de una disminución en las atracciones intermoleculares, un mayor espacio entre cadenas moleculares y una movilidad más alta en la matriz de la película debido a la inclusión de más moléculas de glicerol entre las cadenas po-

liméricas (Caicedo y cols., 2022). Esta inclusión de glicerol podría suscitar la difusividad del agua mediante el sistema compuesto de la película de PBCP a través de una disminución en la cantidad de obs-

táculos que bloquean las moléculas de agua a medida que pasan a través de la red de biopolímeros (Sothornvit y Krochta, 2005).

Tabla 1. Permeabilidad del vapor de agua (PVA) de películas a base de cáscara de plátano.

Contenido de glicerol (% p/p)	Centrifugación del pulverizado (rpm)	Temperatura de calentamiento (°C)	PVA (g·mm/kPa·h·m ²)
30	900	70	3,54
		80	2,79
		90	3,03
	1500	70	3,26
		80	3,36
		90	3,47
	3000	70	3,19
		80	3,79
		90	4,23
50	900	70	3,84
		80	3,96
		90	4,34
	1500	70	4,01
		80	3,95
		90	4,44
	3000	70	4,45
		80	4,62
		90	4,98

La elevada hidrofilia de las moléculas de glicerol, y las diferentes temperaturas de calentamiento y rpm, no influyeron en la PVA en ninguna de las concentraciones de glicerol ($p > 0,05$). Como se describió anteriormente, se puede suponer que hay una reducción en el tamaño de partícula a medida que aumentan las revoluciones por minuto y la temperatura. Un tamaño de partícula reducido podría disminuir la PVA, lo que podría explicar por qué en estas circunstancias es más difícil la formación de un camino que las moléculas de agua deben cruzar para difundirse a través de la matriz (Dangaran y cols., 2006). Sin embargo, en el presente estudio, con el aumento de la temperatura o el número de revoluciones por minuto no se observó tal efecto en la PVA sobre las películas, probablemente debido a la reaglomeración de pequeñas partículas de biopolímero durante la formación de la película (García y cols., 2020). Se sugiere el uso de un emulsionante para evitar la reaglomeración.

Los valores de PVA de las películas de PBCP en las diferentes condiciones oscilaron entre 2,8 y

5,0 g·mm/kPa·h·m² (Tabla 1), que es comparable con los hallazgos de estudios anteriores que utilizaron aislado de proteína de soya, harina de mostaza desgrasada, gelatina de pescado y cáscara de manzana realizados por Sablani y cols. (2009), Hendrix y cols. (2012), Cho y Rhee (2004) y Kim y Min (2012), respectivamente.

Sin embargo, los resultados de PVA en las películas de PBCP fueron superiores comparados con los estudios que incluyeron metilcelulosa (6,8 g·mm/kPa·h·m²), gelatina de piel de cerdo (0,1–6,3 g·mm/kPa·h·m²), caseinato de sodio (4,0 g·mm/kPa·h·m²) y cera de abejas (3,8–7,0 g·mm/kPa·h·m²), datos referenciales con base a las investigaciones de Talja, Helen, y cols. (2008) y Avena-Bustillos y cols. (2006). Por otro lado, Vargas y cols. (2008) reportaron valores más altos de PVA en estudios que usaron almidón de papa (8,0 g·mm/kPa·h·m²) y alginato de algas pardas (14,0 g·mm/kPa·h·m²).

La PVA alta en el presente estudio se puede atribuir a la naturaleza hidrófila de los polímeros de PBCP y la naturaleza polar del glicerol. Un PVA alto podría limitar el uso de estas películas para alimentos con niveles de humedad bajos o intermedios (Valero-Valdivieso y cols., 2013). Por lo tanto, se sugiere más investigación para desarrollar métodos para la producción de películas con sensibilidad reducida a la humedad que se puedan aplicar a alimentos con altos niveles de humedad.

3.4 Prueba de biodegradabilidad

De acuerdo a los datos obtenidos se determina que la película de 3000 rpm, calentamiento de 90 °C y 50% de glicerina presenta mayor degradabilidad tanto a la intemperie como en medio acuoso, con un porcentaje de 47% y 55%, respectivamente, lo cual es equiparable con la investigación realizada por García (2019) que determinó porcentajes de biodegradabilidad en películas de biopolímero de 43% a 47% en un lapso de un mes.

4 Conclusiones

La absorción de agua en el equilibrio fue mayor y la barrera contra la humedad fue menor en las películas con 50% de glicerol. Por lo tanto, debido a que la sensibilidad a la humedad de las películas de PBCP estuvo fuertemente influenciada por la concentración de glicerol, la sensibilidad de la película se puede modular variando la concentración de glicerol.

Referente a la biodegradabilidad, las PBCP presentan valores similares a los de otras investigaciones, pero se debe medir su eficiencia en condiciones de anaerobiosis. Además, se recomienda utilizar un emulsificante para mejorar la reaglomeración y posteriormente realizar nuevas mediciones para identificar con mayor precisión el efecto de las temperaturas de calentamiento en las propiedades de las películas de biopolímeros de cáscara de plátano.

Contribución de los autores

J.T.: Conceptualización, investigación, metodología, recursos, supervisión, validación, escritura – revisión y edición. **R.J.:** Curación de datos, adquisición de financiación, administración del proyecto.

M.S.: Análisis formal, visualización, escritura – borrador original.

Referencias

- Altemimi, A. B. (2018). Extraction and optimization of potato starch and its application as a stabilizer in yogurt manufacturing. *Foods*, 7(2), 2. Online: <https://doi.org/10.3390/foods7020014>
- Anhwange, B. A., Ugye, T. J., y Nyiaatagher, T. D. (2009). Chemical composition of musa sapientum (banana) peels. *Electronic Journal of Environmental, Agricultural and Food Chemistry*, 8(6), 437–442. Online: <https://n9.cl/kpc56>
- Avena-Bustillos, R. j., Olsen, C. w., Olson, D. a., Chiou, B., Yee, E., Bechtel, P. j., y McHugh, T. h. (2006). Water vapor permeability of mammalian and fish gelatin films. *Journal of Food Science*, 71(4), E202–E207. Online: <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2006.00016.x>
- Caicedo, C., Díaz-Cruz, C. A., Jiménez-Regalado, E. J., y Aguirre-Loredo, R. Y. (2022). Effect of plasticizer content on mechanical and water vapor permeability of maize starch/pvoh/chitosan composite films. *Materials*, 15(4), 1274. Online: <https://doi.org/10.3390/ma15041274>
- Cho, S. Y., y Rhee, C. (2004). Mechanical properties and water vapor permeability of edible films made from fractionated soy proteins with ultrafiltration. *Lebensmittel-Wissenschaft Und -Technologie. Food Science and Technology*. Online: <https://n9.cl/lpztv0>
- Coma, V., Sebti, I., Pardon, P., Pichavant, F. H., y Deschamps, A. (2003). Film properties from crosslinking of cellulosic derivatives with a polyfunctional carboxylic acid. *Carbohydrate Polymers*, 51(3), 265–271. Online: [https://doi.org/10.1016/S0144-8617\(02\)00191-1](https://doi.org/10.1016/S0144-8617(02)00191-1)
- Dangaran, K. L., Cooke, P., y Tomasula, P. M. (2006). Effect of protein particle size reduction on the physical properties of co2-precipitated casein films. *Journal of Food Science*. Online: <http://hdl.handle.net/10113/1840>
- Dao, D. N., Le, P. H., Do, D. X., Dang, T. M. Q., Nguyen, S. K., y Nguyen, V. (2022). Pectin and cellulose extracted from coffee pulps and their potential

- in formulating biopolymer films. *Biomass Conversion and Biorefinery*. Online: <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02339-x>
- Eixenberger, D., Carballo-Arce, A.-F., Vega-Baudrit, J.-R., Trimino-Vazquez, H., Villegas-Peñaranda, L. R., Stöbener, A., ... Liese, A. (2022). Tropical agroindustrial biowaste revalorization through integrative biorefineries—review part ii: Pineapple, sugarcane and banana by-products in costa rica. *Biomass Conversion and Biorefinery*. Online: <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02721-9>
- García, G. (2019). *Obtención de un biopolímero a partir de harina de plátano de desecho (musa x paradisiaca)*. Online: <https://n9.cl/gkcpd> (70.)
- García, M. A., Rodríguez, M., Castro, C., y de la Paz, N. (2020). Water vapor permeability of chitosan/zeolite composite films as affected by biopolymer and zeolite microparticle concentrations. *Journal of Packaging Technology and Research*, 4(2), 157–169. Online: <https://doi.org/10.1007/s41783-020-00092-y>
- Hendrix, K. M., Morra, M. J., Lee, H.-B., y Min, S. C. (2012). Defatted mustard seed meal-based biopolymer film development. *Food Hydrocolloids*, 26(1), 118–125. Online: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2011.04.013>
- Hoof, B. V., Monroy, N., y Saer, A. (2018). *Producción más limpia: Paradigma de gestión ambiental*. (Primera edición. Universidad de los Andes. ISBN 9786077073598)
- Iguardia, C. (2013). *Síntesis y caracterización de bioplástico a partir de almidón de banano verde | iica - catálogo bioeconomía*. Online: <https://n9.cl/84drei>
- Juárez Chunga, A. S. (2022). *Efecto del recubrimiento de almidón de maíz nativo (zea mays l.) y de la temperatura de secado sobre características fisicoquímicas y sensoriales de snack de tiras de pimiento morrón rojo (capsicum annuum l.)*. Online: <https://n9.cl/4yy9pg> (Universidad Privada Antenor Orrego - UPAO)
- Kang, H. J., Won, M. Y., Lee, S. J., y Min, S. C. (2015). Plasticization and moisture sensitivity of potato peel-based biopolymer films. *Food Science and Biotechnology*, 24(5), 1703–1710. Online: <https://doi.org/10.1007/s10068-015-0221-x>
- Kim, D., y Min, S. C. (2012). Trout skin gelatin-based edible film development. *Journal of Food Science*, 77(9), E240–E246. Online: <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2012.02880.x>
- Lucero-Murillo, J., Manzano-Torres, J., Loaiza-Maldonado, I., y Orellana-García, Y. (2026). In vitro propagation of banana (musa spp.) by somatic embryogenesis. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*, 43(1), 127–143. doi: <https://doi.org/10.17163/lgr.n43.2026.09><https://doi.org/10.17163/lgr.n43.2026.07>
- McHugh, T. H., y Krochta, J. M. (1994). Sorbitol- vs glycerol-plasticized whey protein edible films: Integrated oxygen permeability and tensile property evaluation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 42(4), 841–845. Online: <https://doi.org/10.1021/jf00040a001>
- Mejía Osorio, D. C. (2020). *Estudio del manejo de residuos plásticos en colombia*. Online: <https://n9.cl/d69tg8>
- Mikus, M., y Galus, S. (2022). Biopolymers from agriculture waste and by-products. En *Biopolymers: Recent updates, challenges and opportunities* (pp. 111–128). Springer International Publishing. Online: https://doi.org/10.1007/978-3-030-98392-5_6
- Minelli, M., Baschetti, M. G., Doghieri, F., Ankersfors, M., Lindström, T., Siró, I., y Plackett, D. (2010). Investigation of mass transport properties of microfibrillated cellulose (mfc) films. *Journal of Membrane Science*, 358(1–2), 67–75. Online: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2010.04.030>
- Muscat, D., Adhikari, R., Tobin, M. J., McKnight, S., Wakeling, L., y Adhikari, B. (2014). Effect of spatial distribution of wax and peg-isocyanate on the morphology and hydrophobicity of starch films. *Carbohydrate Polymers*, 111, 333–347. Online: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.04.072>
- NTE INEN 612. (2006). *Harina de trigo. requisitos*. Online: <https://n9.cl/o3mir>
- Ospina, S. (2015). Biopolímeros y su aplicación en medio ambiente. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 17(2), 2. Online: <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v17n2.54295>
- Pacheco, M. A. M., Montealegre, V. J. G., Romero, H. R. C., y Campoverde, J. M. Q. (2021). Análisis

- de la participación del banano en las exportaciones agropecuarias del ecuador periodo 2015-2019. *Revista Metropolitana de Ciencias Aplicadas*, 4(2), 2. Online: <https://n9.cl/yaaidr>
- Pak, E. S., Ghaghelestani, S. N., y Najafi, M. A. (2020). Preparation and characterization of a new edible film based on persian gum with glycerol plasticizer. *Journal of Food Science and Technology*, 57(9), 3284–3294. Online: <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04361-1>
- Pérez-Gago, M. B. (2012). *Protein-based films and coatings*. Online: <https://doi.org/10.3390/polym13050769> (Impreso, 13–77.)
- Ramos, T. P., Guevara-Llerena, D. J., Sarduy-Pereira, L. B., y Diéguez-Santana, K. (2020). Producción más limpia y ecoeficiencia en el procesamiento del cacao: Un caso de estudio en Ecuador. *Investigación & Desarrollo*, 20(1), 135–146. Online: <https://doi.org/10.23881/idupbo.020.1-10i>
- Sablani, S. S., Dasse, F., Bastarrachea, L., Dhawan, S., Hendrix, K. M., y Min, S. C. (2009). Apple peel-based edible film development using a high-pressure homogenization. *Journal of Food Science*, 74(7), E372–E381. Online: <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2009.01273.x>
- Sanchez, C., Pouliot, M., Renard, D., y Paquin, P. (1999). Uniaxial compression of thermal gels based on microfluidized blends of wpi and heat-denatured wpi. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 47(3), 1162–1167. Online: <https://doi.org/10.1021/jf980577o>
- Sothornvit, R., y Krochta, J. M. (2005). 23—plasticizers in edible films and coatings. En *Innovations in food packaging* (pp. 403–433). Academic Press. Online: <https://doi.org/10.1016/B978-012311632-1/50055-3>
- Taghavi Kevij, H., Salami, M., Mohammadian, M., Khodadadi, M., y Emam-Djomeh, Z. (2021). Mechanical, physical, and bio-functional properties of biopolymer films based on gelatin as affected by enriching with orange peel powder. *Polymer Bulletin*, 78(8), 4387–4402. Online: <https://doi.org/10.1007/s00289-020-03319-9>
- Talja, R. A., Helen, H., Roos, Y. H., y Jouppila, K. (2008). Effect of type and content of binary polyol mixtures on physical and mechanical properties of starch-based edible films. *Carbohydrate Polymers*. Online: <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2007.05.037>
- Talja, R. A., Peura, M., Serimaa, R., y Jouppila, K. (2008). Effect of amylose content on physical and mechanical properties of potato-starch-based edible films. *Biomacromolecules*, 9(2), 658–663. Online: <https://doi.org/10.1021/bm700654h>
- Tatirat, O., y Charoenrein, S. (2011). Physicochemical properties of konjac glucomannan extracted from konjac flour by a simple centrifugation process. *LWT - Food Science and Technology*, 44(10), 2059–2063. Online: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2011.07.019>
- Tuárez, M. A., Laz, M. L., Córdova, R. A., y Conforme, J. V. (2022). Migración química desde envases fabricados con polipropileno hacia alimentos grasos. *Revista ESPAMCIENCIA ISSN 1390-8103*, 13(1), 1. Online: https://doi.org/10.51260/revista_espamciencia.v13i1.286
- Valero-Valdivieso, M. F., Ortegón, Y., y Usategui, Y. (2013). Biopolímeros: Avances y perspectivas. *DYNA*, 80(181), 171–180.
- Vargas, M., Pastor, C., Chiralt, A., McClements, D. J., y González-Martínez, C. (2008). Recent advances in edible coatings for fresh and minimally processed fruits. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 48(6), 496–511. Online: <https://doi.org/10.1080/10408390701537344>



OPTIMIZACIÓN DE LOS FACTORES DE HIDRÓLISIS ÁCIDA PARA
OBTENER GLUCOSA DE LOS RESIDUOS DE BANANO, CACAO, PALMA
AFRICANA Y BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR

OPTIMIZATION OF THE ACID HYDROLYSIS FACTORS FOR OBTAINING
GLUCOSE FROM BANANA, CACAO, AFRICAN PALM, AND SUGARCANE
BAGASSE RESIDUES

Mónica F. Abril-González¹, Angélica M. Vele-Salto*¹ y Verónica Pinos-Vélez¹

IRCMA, Departamento de Biociencias, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad de Cuenca, Eco-Campus Balzay, Cuenca-Ecuador. [<https://ror.org/04r23zn56>]

*Autor para correspondencia: angelicam.vele@ucuenca.edu.ec

Manuscrito recibido el 14 de diciembre de 2021. Aceptado, tras revisión el 1 de agosto de 2022. Publicado el 1 de marzo de 2026.

Resumen

La biomasa es una alternativa estudiada para proporcionar fuentes de energía que reemplacen a los combustibles fósiles. El objetivo de esta investigación es optimizar las condiciones de la reacción de hidrólisis ácida para la obtención de glucosa a partir de la biomasa procedente de los residuos de banano, cacao, bagazo de caña de azúcar y palma africana. Las condiciones fueron evaluadas a través de un diseño experimental 2^k . Los factores estudiados fueron la temperatura, el tiempo y la concentración de ácido; los niveles mínimo y máximo corresponden a 70 a 120 °C, 20 a 150 min y 1% al 5% v/v, respectivamente. Además, se realizaron dos réplicas al centro. Las mejores condiciones encontradas para la obtención de glucosa fueron: 120 °C, 150 min y 1% de ácido sulfúrico. El bagazo de caña de azúcar y el raquis de palma africana fueron las biomásas de las que se obtuvo el mayor contenido de glucosa 9 936,48 y 7745,14, respectivamente. Se discute la influencia de la composición de la biomasa en la cantidad de glucosa obtenida.

Palabras clave: Hidrólisis ácida, biomasa, glucosa, caracterización estructural.

Abstract

Biomass is an alternative to provide energy sources that replace fossil fuels. The objective of this investigation is to optimize the conditions of the acid hydrolysis reaction for obtaining glucose from biomass: banana rachis, cacao pod, African palm rachis, and sugarcane bagasse. The conditions were evaluated through a 2^k experimental design. The factors studied were temperature, time, and acid concentration; the minimum and maximum levels correspond to 70 to 120 °C, 20 to 150 min, and 1% to 5% v/v, respectively. In addition, two replicates were made to the center. The best conditions for obtaining glucose were: 120 °C, 150 min and 1% v/v sulfuric acid. Sugarcane bagasse and African palm rachis were the biomasses from which the highest glucose content was obtained, 9936.48 and 7745.14 mg/L, respectively. The influence of biomass composition on the amount of glucose obtained is discussed.

Keywords: Acid hydrolysis, biomass, glucose, structural characterization.

Forma sugerida de citar: Abril-González, M. F., Vele-Salto, A. M. y Pinos-Vélez, V. (2026). Optimización de los factores de hidrólisis ácida para obtener glucosa de los residuos de banano, cacao, palma africana y bagazo de caña de azúcar. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*. Vol. 43(1):178-190. <https://doi.org/10.17163/lgr.n43.2026.10>.

Orcid IDs:

Mónica Abril González: <https://orcid.org/0000-0002-6449-7875>
Angélica María Vele Salto: <https://orcid.org/0000-0001-6937-0534>
Verónica Pinos Vélez: <https://orcid.org/0000-0001-8278-5873>

1 Introducción

El cambio en las fuentes de energía constituye un desafío real. Con el objetivo de reducir el consumo de petróleo, la búsqueda de materiales más sostenibles y con menor impacto ambiental a lo largo de su ciclo de vida conduce a la selección de materias primas renovables o a la mejora de los procesos utilizados para obtener los productos finales. El uso de biomasa lignocelulósica, principalmente derivada de residuos agrícolas, ha aumentado en los últimos años debido a que estos residuos son renovables en comparación con las materias primas de origen fósil (Thompson y cols., 2017; Yáñez-Iñiguez y cols., 2020). Sin embargo, el principal obstáculo para su utilización es la ausencia de una tecnología de bajo costo capaz de degradar los polisacáridos presentes en la biomasa, de manera que el material lignocelulósico pueda transformarse en azúcares solubles (Adsul y cols., 2020; Loow y cols., 2015; Faba y cols., 2014). En Ecuador, existe una amplia disponibilidad de materia prima renovable derivada de los principales cultivos permanentes del país, como se indica en los datos presentados en el Atlas Bioenergético del Ecuador (2014) (Ministerio de Electricidad y Energía Renovable del Ecuador, 2014), y los cuatro principales se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Residuos generados por cultivos permanentes en el Ecuador.

Cultivo	Residuos (Tn/año)
Palma africana	6 872 469,27
Banano	4 926 095,60
Cacao	2 015 352,60
Caña de azúcar	793 283,38

Los residuos indicados en la Tabla 1 pueden provenir tanto del campo como del procesamiento, y es posible obtener biocombustibles de segunda generación que no implican un riesgo para las fuentes alimentarias. El material lignocelulósico está compuesto por celulosa, hemicelulosa y lignina. Estos polímeros contienen numerosos grupos funcionales activos capaces de reaccionar (Odalanowska y cols., 2021; Yogalakshmi y cols., 2022). Los polímeros de celulosa son unidades glicosídicas unidas mediante enlaces β -1,4-glicosídicos, que son muy estables y difíciles de hidrolizar por vía química o enzimática.

La hemicelulosa se hidroliza con mayor facilidad que la celulosa y produce pentosas de alto valor, como xilosa y arabinosa. La lignina, por su parte, presenta una estructura polimérica muy compleja (Sun y cols., 2016; Okolie y cols., 2021).

Una de las principales y más comunes tecnologías de tratamiento de biomasa es la hidrólisis ácida; este método es preferido por su bajo costo y su efectividad en el fraccionamiento de las hemicelulosas hasta obtener monómeros, a la vez que induce cambios estructurales en las fracciones (Loow y cols., 2016). En general, se utilizan ácidos sulfúrico, clorhídrico y nítrico, aunque los dos últimos en menor medida. Los tratamientos con altas concentraciones de ácido generan problemas de corrosividad y su manipulación resulta peligrosa; por ello, es más común la aplicación de tratamientos con ácido diluido (Hoang y cols., 2021; Yuan y cols., 2022).

A nivel industrial, la hidrólisis de biomasa constituye una etapa fundamental para la obtención de biocombustibles de segunda generación, como en el caso específico del bioetanol. Por tanto, la mejora del rendimiento hacia monosacáridos, especialmente glucosa, influirá de manera positiva en los procesos de manufactura posteriores (Duque y cols., 2021).

La glucosa es la molécula más abundante de la biomasa en la naturaleza. Al ser la unidad monomérica del biopolímero celulosa, considerado el más abundante, constituye una materia prima sostenible para la producción de combustibles para el transporte, productos químicos y polímeros a base de carbono (Dutta y Bhat, 2022). Su propiedad de solubilidad en agua la convierte en una alternativa prometedora para producir de manera eficiente compuestos químicos y biocombustibles de alto valor. Los productos C6 obtenidos a partir de glucosa son particularmente adecuados, ya que sus síntesis presentan una economía de carbono del 100% (Liu y cols., 2015).

La Tabla 2 presenta algunos resultados de diferentes investigaciones, verificando que el ácido sulfúrico diluido es el más utilizado; sin embargo, los factores que intervienen en la reacción, tanto la temperatura como el tiempo, suelen ser elevados, lo que implica un mayor consumo energético.

El objetivo de esta investigación es aprovechar la biomasa residual obtenida en grandes cantidades en el Ecuador, principalmente generada a partir de cultivos de banano, cacao, palma africana y caña de azúcar, y proporcionar alternativas para su uso en la producción de biocombustibles u otros productos derivados. Esto contribuirá positivamente al desarrollo de la industria energética en el país, de manera económica, técnica y ambientalmente sostenible. Para ello, se estudia el proceso de hidrólisis ácida diluida mediante un diseño experimental

que optimiza los valores de temperatura, tiempo y concentración de ácido, con el fin de maximizar la conversión de glucosa. Además, se analizan estadísticamente las interacciones entre los factores para determinar su influencia, lo que también favorece la toma de decisiones respecto a las condiciones de reacción. Asimismo, se caracterizó cada biomasa estructuralmente para generar una base de datos que permita conocer su composición y sus posibles aplicaciones en la industria, así como su efecto en la conversión a glucosa.

Tabla 2. Resultados obtenidos de procesos de hidrólisis de biomasa.

Biomasa	Ácido	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Concentración (%)	Glucosa (g·L ⁻¹)	Fuente bibliográfica
Bagazo de caña	Ácido sulfúrico	90	60	0,5	0,65	(Roslan y Salimi, 2020)
Bagazo de caña	Ácido sulfúrico	122	24	1	3	(Dussan y cols., 2014)
Raquis palma	Ácido sulfúrico	210	5	0,8	6,27	(Millati y cols., 2011)
Raquis palma	Ácido sulfúrico	100	240	6	1,43	(Amirkhani y cols., 2015)
Raquis banano	Ácido sulfúrico	170	120	5	0,30*	(El-Zawawy y cols., 2011)
Raquis banano	Ácido clorhídrico	150	280	3	0,40*	(Sathendra y cols., 2019)
Mazorca cacao	Ácido sulfúrico	90	240	1 M	1,70	(Samah y cols., 2011)
Mazorca cacao	Acido clorhídrico	20	441,6	8,36	4,09*	(Shet y cols., 2018)

* Azúcares reductores.

2 Materiales y Métodos

2.1 Reactivos

El ácido sulfúrico de grado analítico se adquirió de Fisher Chemical (Center Valley, PA, EE. UU.). La glucosa estándar analítica y el clorito de sodio se adquirieron de Sigma-Aldrich (St. Louis, MO, EE. UU.). El etanol, el tolueno, el ácido acético glacial y el hidróxido de sodio de grado analítico fueron adquiridos de Merck (Darmstadt, Alemania). El agua destilada se obtuvo mediante un destilador Water Still WS 8000 (Boeco, Alemania). El agua tipo I se obtuvo de un sistema de purificación Barnstead Water (Thermo Fisher Scientific, Kansas, EE. UU.).

2.2 Material vegetal y preparación de muestras

La biomasa de banano, cacao y palma aceitera se obtuvo de los cultivos de la "Hacienda San José",

ubicada en la provincia de Los Ríos – Ecuador, km 8,5 Babahoyo - Febres Cordero, en las coordenadas 1°53'15,7"S, 79°29'18,8"W. La variedad de banano utilizada fue *Musa acuminata*, subgrupo Cavendish del Grupo AAA; la variedad de cacao fue CC N51, y la palma africana pertenecía a la familia *Arecaceae*, subgrupo *Commelinidae*.

El bagazo de caña de azúcar se obtuvo en una finca del valle de Yunguilla, al suroeste de Cuenca, en las coordenadas 3°17'58,843"S, 79°17'59,497"W, siendo la variedad Canalpoa. Las plantas fueron cortadas para recolectar el racimo durante la cosecha. El área de cosecha fue delimitada y los residuos se recolectaron de doce plantas de banano distribuidas aleatoriamente en el terreno. Cada planta se separó en sus diferentes partes: raquis de banano, mazorca de cacao, raquis de palma africana y bagazo de caña, de acuerdo con sus características físico-químicas, por lo que se esperaban distintas concentraciones de monosacáridos.

Se tomaron muestras de aproximadamente 300 g de cada parte, las cuales fueron almacenadas en bolsas plásticas herméticamente selladas para su transporte al laboratorio, donde se lavaron con agua pura para eliminar residuos químicos (p. ej., pesticidas o insecticidas). Posteriormente, las muestras se cortaron en secciones de aproximadamente 5 mm y se secaron en estufa (marca Innotech, modelo BJPX-Summer) a 105 °C hasta peso constante, por aproximadamente 24 horas. Luego se trituraron en un molino de corte (ALQUIMIA, modelo MC002) y se tamizaron para obtener un tamaño de partícula máximo de 5 μ m. Las muestras preparadas se almacenaron en bolsas plásticas a 2 °C hasta su análisis.

2.3 Caracterización estructural

En primer lugar, se eliminó de la biomasa el material extractivo y no estructural para evitar interferencias en los pasos analíticos posteriores (National Renewable Energy Laboratory, 2008). Los extractivos se eliminaron de acuerdo con la norma ASTM D1107, utilizando etanol-tolueno como solvente y un equipo de extracción Soxhlet. Se colocaron 7 g de muestra en el cartucho y se añadieron 150 mL de solvente, manteniendo el líquido en ebullición durante 7 horas, tras lo cual la muestra se secó hasta peso constante (ASTM International, 2021).

Una vez eliminados los extractos, se determinó el contenido de lignina insoluble en ácido siguiendo la norma TAPPI 222 (TAPPI, 2006). Se utilizó 1 g de muestra libre de extractos y se le añadieron gradualmente 15 mL de ácido sulfúrico al 72%. Los carbohidratos fueron hidrolizados y solubilizados por el ácido, mientras que la lignina insoluble se filtró, secó y pesó.

Para determinar el porcentaje de holocelulosa (celulosa y hemicelulosa), se aplicó la norma ASTM D1104, que se obtiene a través de un proceso de cloración para eliminar la lignina. Se emplearon 2,5 g de muestra libre de extractos, 80 mL de agua destilada caliente, seguidos de 0,5 mL de ácido acético y 1 g de clorito de sodio, con cuatro repeticiones de esta adición (ASTM International, 1956). La celulosa se obtuvo a partir de la fracción de holocelulosa mediante la norma TAPPI 212, que consiste en tratar 2 g de holocelulosa libre de extractos con 10 mL de hidróxido de sodio al 17,5% para degradar la hemicelulosa; su contenido se determinó por diferencia

entre holocelulosa y celulosa (TAPPI, 2002).

2.4 Diseño experimental para la reacción de hidrólisis ácida

La hidrólisis ácida se llevó a cabo en un reactor por lotes (THR 250 de alta presión) con capacidad de 50 mL, equipado con manómetro, sensores de temperatura y sistema de agitación mecánica. El material de construcción fue acero inoxidable SS304L recubierto de teflón para reducir la corrosión por ataque ácido.

Se obtuvieron monosacáridos a partir de 3 g de biomasa usando 60 mL de solución acuosa ácida (v/v). Para estudiar la influencia de la concentración de ácido, la temperatura y el tiempo de reacción sobre la cantidad de glucosa recuperada, se aplicó un diseño factorial 2^k para cada biomasa. La Tabla 3 presenta el diseño de tres factores con dos niveles por factor aplicado a cada biomasa. Se realizaron dos réplicas en el punto central. Los factores temperatura, tiempo de reacción y concentración de ácido se evaluaron en intervalos de 70–120 °C, 20–150 min y 1–5 % v/v H_2SO_4 , respectivamente. Estas condiciones se aplican a distintas biomásas (raquis de banano, mazorca de cacao, raquis de palma africana y bagazo de caña), y las soluciones obtenidas se filtraron con papel Whatman N°54 y se neutralizaron con solución de hidróxido de sodio al 30% (p/p). Posteriormente, las muestras fueron analizadas inmediatamente en HPLC.

2.5 Análisis cromatográfico

La concentración de glucosa en los residuos vegetales hidrolizados se analizó en un sistema HPLC (Jasco LC4000) equipado con un termostato (Jasco CO4061), un detector de índice de refracción (IR4030), una bomba cuaternaria (PU4180) y un inyector manual. El volumen de inyección fue de 10 μ L. La columna utilizada fue VA 300 / 7,8 Nucleogel, Sugar 810 Ca, (300 \times 7,8 mm) (Macherey-Nagel, Alemania). La temperatura de la columna, el caudal y la concentración de ácido sulfúrico (fase móvil) fueron de 85 °C, 0,5 mL/min y 0,01 % v/v de ácido sulfúrico, respectivamente. La cuantificación se realizó utilizando curvas de calibración de soluciones mixtas de los monosacáridos ensayados en concentraciones de 500 a 5 000 mg/L. La operación del instrumento y el procesamiento de datos

se llevaron a cabo con ChromNAV Ver. 2.1.0 (Jasco Corporation, Tokio, Japón).

2.6 Análisis estadístico

Para determinar los efectos y las interacciones significativas se utilizó el gráfico de efectos normales, considerando significativos aquellos efectos situados fuera de la línea. Los efectos individuales y de interacción se determinaron gráficamente. Para obtener los modelos lineales de cada biomasa, se verificaron los supuestos de homocedasticidad y normalidad mediante gráficos cuantil-cuantil normales, boxplots y las pruebas de Shapiro-Wilk y Levene (resultados no mostrados); en todos los casos los supuestos se cumplieron. Para determinar la diferencia de medias entre biomásas se aplicó un ANOVA de una vía. Cuando se obtuvieron diferencias significativas con un nivel de significancia de 0,05, se aplicó una prueba post hoc de diferencia de me-

dias con la corrección de Bonferroni. El error se calculó a partir de las réplicas en el punto central. Para todos los análisis se empleó el programa R versión 4.0.4 con la interfaz RStudio.

3 Resultados y Discusión

3.1 Caracterización estructural de la biomasa

El material lignocelulósico está compuesto principalmente por celulosa, hemicelulosa, lignina, cenizas y compuestos extractivos solubles en diferentes disolventes, además de impurezas. Para este estudio, se determinaron los componentes más relevantes en la obtención de monosacáridos. La Tabla 3 presenta los resultados obtenidos para α -celulosa, hemicelulosa, lignina insoluble y extractivos etanol-tolueno de cada tipo de biomasa. Todos los análisis se realizaron por triplicado.

Tabla 3. Caracterización estructural del raquis de banano, raquis de palma africana, mazorca de cacao y bagazo de caña de azúcar.

Biomasa	Holocelulosa (%)	α -Celulosa (%)	Hemicelulosa (%)	Lignina (%)	Extractivos etanol-tolueno (%)
Raquis de banano	55,62	31,40 \pm 0,519	24,23 \pm 0,519	7,67 \pm 0,001	3,49 \pm 0,003
Raquis de palma africana	71,00	48,11 \pm 0,449	22,89 \pm 0,449	14,97 \pm 0,003	3,85 \pm 0,004
Mazorca de cacao	40,90	25,54 \pm 0,291	15,36 \pm 0,291	23,44 \pm 0,003	2,53 \pm 0,004
Bagazo de caña	74,84	46,19 \pm 0,290	28,64 \pm 0,290	18,33 \pm 0,007	5,71 \pm 0,004

Como se observa en la Tabla 3, al caracterizar estructuralmente la biomasa se obtuvo un mayor contenido de α -celulosa en la palma africana con 48,11%, seguida del bagazo de caña con 46,19% y el raquis de banano con 31,40%. Estos resultados son similares a los obtenidos por Kumneadklang y cols. (2019) quienes reportaron 42,67% para la palma africana, mientras que en los estudios presentados por Oliveira para el raquis de banano se alcanzó un 28,4% (Oliveira y cols., 2007). En cuanto a la hemicelulosa, el bagazo predomina con 28,64%, valor semejante al reportado en las investigaciones de Moraes Rocha con 27,6% (Dussan y cols., 2014). El mayor contenido de lignina se presenta en la mazorca de cacao, con 23,44%, valor que se encuentra dentro del rango de 14–28% establecido en los es-

tudios de Lu y cols. (2018). El raquis de banano, en cambio, presentó el valor mínimo de 7,67%, frente al 9,6% reportado en los estudios de Oliveira. Estos porcentajes reflejan que cada biomasa presenta un predominio en distintos componentes, lo cual influirá en el proceso de conversión hacia glucosa. Aquellas biomásas con altos contenidos de celulosa y hemicelulosa tendrán un mejor rendimiento en la conversión a monosacáridos.

3.2 Hidrólisis ácida

En los resultados presentados en la Tabla 4, la mayor cantidad de glucosa se obtuvo con el bagazo de caña de azúcar y la menor con el raquis de banano. Roslan et al. (2006) utilizaron biomasa de bagazo de

caña con una concentración de 1% de ácido sulfúrico, a una temperatura de 122 °C durante 24 minutos de reacción, obteniendo un rendimiento de 3 g de glucosa/L (Roslan y Salimi, 2020).

Dussan et al. (2014) también experimentaron con bagazo de caña, bajo condiciones de reacción de 90 °C, 60 minutos y una concentración de ácido sulfúrico de 0,5%, obteniendo un rendimiento máximo de azúcares totales de 0,65 g/L (Dussan y cols., 2014). Las condiciones de reacción de esas investigaciones son similares a las del presente estudio en cuanto a temperatura y concentración; sin embargo, la variable de tiempo es mayor, alcanzando 150 minutos, lo cual podría influir en el incremento del rendimiento obtenido en este trabajo.

Esta cantidad de glucosa puede ser utilizada para la obtención de diversos compuestos químicos de valor agregado y biocombustibles, tales como alcoholes, ácido glucónico, 5-hidroximetilfurfural (HMF), ácido láctico, ésteres de ácido pentanoico y 2,5-dimetilfurano (2,5-DMF). El HMF puede transformarse en productos químicos de interés industrial como furano y sus derivados, ácido levulínico y ácido fórmico, los cuales actualmente se producen a partir de recursos derivados del petróleo (Liu y cols., 2015; Bali y cols., 2012).

El análisis de la interacción de las variables se describe en la sección 3.3.

Tabla 4. Diseño factorial 2³ con dos réplicas en el punto central.

Etiquetas	Factores			Glucosa (mg/L)			
	a Concentración de ácido	b Temperatura	c Tiempo	Bagazo de caña	Raquis de banano	Mazorca de cacao	Raquis de palma africana
(1)	-1	-1	-1	3 800,90	498,19	2 114,87	2 476,84
a	1	-1	-1	3 145,30	424,85	1 472,60	1 017,43
b	-1	1	-1	4 641,81	1 001,65	2 680,75	6 297,29
ab	1	1	-1	5 942,57	1 787,32	1 526,06	6 542,49
c	-1	-1	1	4 355,34	541,77	880,11	2 657,56
ac	1	-1	1	6 417,91	451,76	849,67	3 089,24
bc	-1	1	1	9 936,48	1 670,22	2 719,70	7 745,14
abc	1	1	1	1 800,71	1 552,54	1 701,08	1 427,80
Rep1	0	0	0	7 118,53	1 220,17	1 615,34	5 888,72
Rep2	0	0	0	7 375,05	1 297,92	1 452,47	5 554,95

Al comparar los resultados de glucosa obtenidos con la caracterización estructural de cada biomasa, tanto el bagazo de caña de azúcar como el raquis de palma africana presentan el mayor contenido de holocelulosa, lo cual se refleja en una mayor conversión a glucosa. Sin embargo, esto no se replica en el caso del raquis de banano y la mazorca de cacao, ya que, aunque la mazorca de cacao presenta un mayor contenido de holocelulosa, su conversión a glucosa es menor. Esto podría deberse a diferentes factores en la composición de estas biomásas, por lo que deben realizarse estudios adicionales para identificarlos.

En la actualidad, se investigan diferentes procesos de pretratamiento para mejorar el rendimiento en la hidrólisis ácida, entre los cuales el uso de líquidos iónicos se encuentra entre los más prometedores. Esta técnica ha demostrado facilitar la descomposición de los biopolímeros al eliminar la protección estructural de los centros de hidrólisis. La segunda parte de esta investigación considerará el uso de dichos líquidos con el fin de mejorar los rendimientos y reducir los requerimientos energéticos.

3.3 Análisis estadístico

En los resultados presentados en la Tabla 5, la mayor cantidad de glucosa se obtuvo con el bagazo de caña de azúcar y la menor con el raquis de banano. Existen diferencias estadísticamente significativas entre la cantidad de glucosa obtenida por cada biomasa, $p(2,47e-06) < 0,001$. Las diferencias se encuentran entre el valor de glucosa obtenido en el bagazo de caña y el raquis de banano, así como entre la mazorca de cacao y el bagazo de caña, con $p(0,000) < 0,001$ en ambos casos. Asimismo, se encontraron diferencias significativas entre el raquis de palma africana y el raquis de banano, y entre el raquis de palma africana y la mazorca de cacao, con $p(0,001) < 0,01$ y $p(0,013) < 0,05$, respectivamente.

Tabla 5. ANOVA de una vía y prueba post hoc.

Biomasa	Media (DE)
Bagazo de caña de azúcar	5 453,46 (2 380,42) ^{a, b}
Raquis de banano	1 044,64 (535,91) ^{a, c}
Mazorca de cacao	1 701,27 (642,86) ^{b, d}
Raquis de palma africana	4 269,75 (2 391,86) ^{c, d}

Para el bagazo de caña de azúcar (Figura 1a), únicamente el factor tiempo resultó estadísticamente significativo, y ninguna interacción fue significativa. Al analizar los efectos, la obtención de glucosa se ve favorecida con los niveles altos de temperatu-

ra y tiempo, y con el nivel más bajo de concentración de ácido (véase Apéndice S1).

En cuanto a las interacciones dobles, estas se observaron entre concentración y temperatura, donde la mayor cantidad de glucosa obtenida se presentó a baja concentración de ácido y alta temperatura. También se encontró interacción entre tiempo y concentración, donde se repitió el mismo caso anterior; los gráficos de interacción doble se muestran en S2. La concentración de ácido y la interacción triple presentan coeficientes negativos (véase Tabla 6). Como puede observarse, la concentración en un nivel alto de ácido reduce el rendimiento, el cual aumenta con mayor temperatura y/o tiempo de reacción.

Para el raquis de banano (Figura 1b), únicamente el factor temperatura fue significativo. Al analizar los efectos, la obtención de glucosa se ve favorecida con los niveles altos de los tres factores, principalmente con el factor temperatura, ya que los otros dos no muestran gran variación en su respuesta entre niveles (véase Apéndice S1). Se encontraron interacciones débiles entre concentración-tiempo y entre temperatura-tiempo; en ambos casos, los mejores resultados se obtuvieron con alta temperatura, mientras que los niveles de los otros factores no tuvieron influencia significativa. La concentración de ácido, la interacción concentración-tiempo y la interacción triple presentaron coeficientes negativos (véase Tabla 6).

Tabla 6. Coeficientes del modelo.

Coefficientes	Bagazo de caña	Raquis de banano	Mazorca de cacao	Raquis de palma africana
Intercepto	3 800,9**	498,19*	2 114,9**	2 476,8*
Concentración	-655,6	-73,34	-642,3	-1 459,4
Tiempo	554,4	43,58	-1 234,8*	180,7
Temperatura	840,9	503,46*	565,9	3 820,4*
Conc.:Tiempo	2 718,2*	-16,67	611,8	1 891,1
Conc.:Temp.	1 956,4	859,01*	-512,4	1 704,6
Tiempo:Temp.	4 740,2**	624,99	1 273,7	1 267,1
Conc.:Tiempo:Temp.	-12 154,7**	-886,68	-475,8	-8 453,6*
Error est. residual	181,4	54,98	115,2	236

Significancia t: * $p < 0,1$; ** $p < 0,05$.

Para la mazorca de cacao (Figura 1c), ni los factores ni las interacciones fueron significativos. Los efectos simples muestran que la obtención de glucosa se favorece con el nivel alto del factor temperatura y con los niveles bajos de los factores concentración de ácido y tiempo (véase Apéndice S1). Se observaron interacciones dobles entre tiempo y temperatura, donde la mayor glucosa obtenida se

presentó al nivel alto de temperatura, sin diferencias en el factor tiempo (véase Apéndice S2). Finalmente, la concentración de ácido, la temperatura, la interacción concentración-temperatura y la interacción triple presentaron coeficientes negativos (véase Tabla 6).

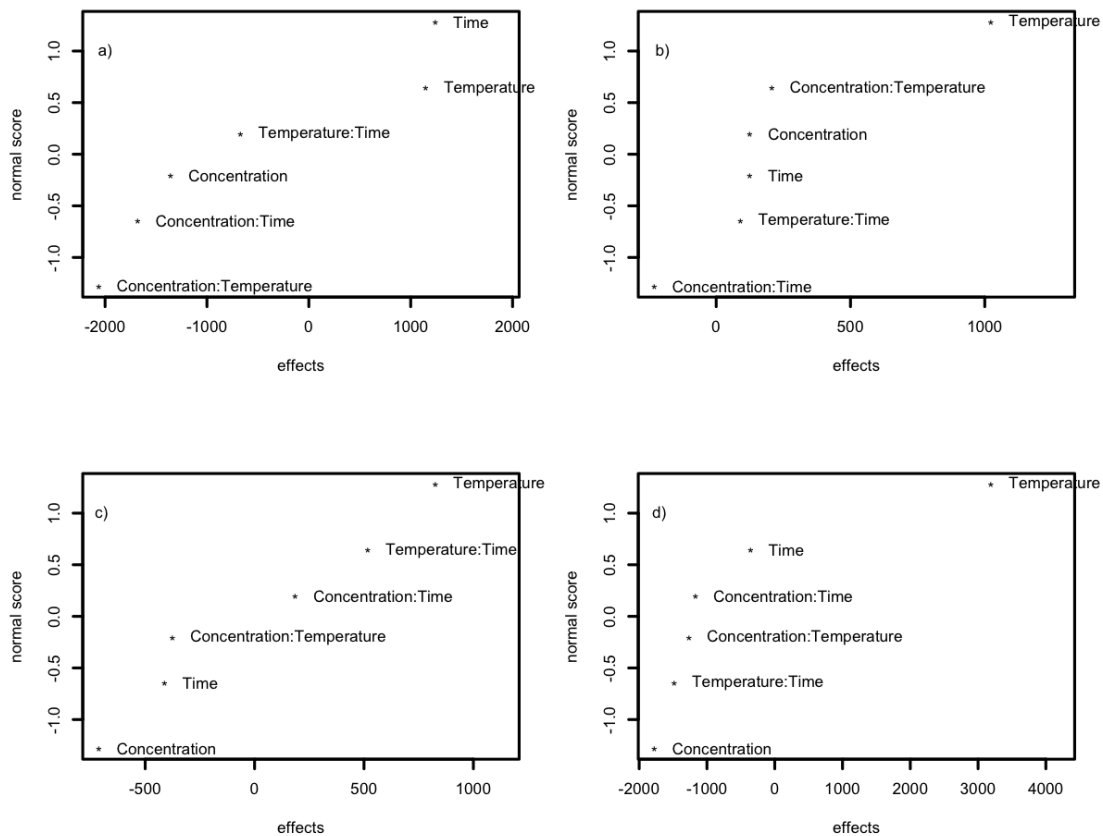


Figura 1. Gráfico de probabilidad normal de efectos estandarizados (a, b, c, d).

4 Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos, se puede concluir que, en el caso de la mazorca de cacao, el raquis de palma africana y el bagazo de caña de azúcar, una temperatura de 120 °C, un tiempo de reacción de 150 min y una concentración de 1% de ácido sulfúrico fueron las condiciones que presentaron los mejores rendimientos de reacción. En estas condiciones, para el raquis de banano se obtuvo un valor de 1670,22 mg/L de glucosa, mientras que

el mejor rendimiento se alcanzó a una temperatura de 120 °C, un tiempo de reacción de 20 minutos y una concentración de ácido del 5%, obteniéndose un valor de 1787,32 mg/L, con una diferencia de 117,1 mg/L.

Además, se evidencia que la composición estructural de cada tipo de biomasa influye en la obtención de glucosa; en este caso, el bagazo de caña de azúcar y el raquis de palma africana fueron los que presentaron mayor contenido de celulosa y he-

micelulosa. En el análisis estadístico, para el bagazo de caña de azúcar únicamente el factor tiempo resultó significativo, mientras que la concentración de ácido en niveles altos redujo el rendimiento. En el caso del raquis de banano y del raquis de palma africana, el factor temperatura fue significativo. Para la mazorca de cacao, ni los factores ni las interacciones fueron significativos.

Finalmente, se alcanzó el objetivo de esta investigación, obteniéndose altos rendimientos de conversión a glucosa que permiten mejorar los procesos posteriores de fabricación de biocombustibles. Se recomienda realizar un estudio de factibilidad técnica y económica que permita lograr un equilibrio entre la cantidad de glucosa obtenida y los costos de producción, de manera que el proceso resulte rentable y pueda aplicarse a gran escala.

Financiamiento

Esta investigación fue financiada por la DIUC – Universidad de Cuenca en el proyecto “Optimización de la reacción de hidrólisis ácida con líquidos iónicos para la obtención de monosacáridos de la biomasa generada por los principales cultivos del Ecuador”.

Contribución de los autores

M.A.G.: Conceptualización, análisis formal, investigación, metodología, visualización, escritura – borrador original, escritura – revisión y edición. **A.V.S.:** Conceptualización, análisis formal, investigación, metodología, visualización, escritura – borrador original, escritura – revisión y edición. **V.P.V.:** Conceptualización, análisis formal, metodología, visualización, escritura – borrador original, escritura – revisión y edición.

Referencias

Adsul, M., Sandhu, S. K., Singhania, R. R., Gupta, R., Puri, S. K., y Mathur, A. (2020). Designing a cellulolytic enzyme cocktail for the efficient and economical conversion of lignocellulosic biomass to biofuels. *Enzyme and Microbial Technology*, 133, 109442. Online: <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2019.109442>

Amirkhani, H., Yunus, R., Rashid, U., Salleh, S. F., Radhiah, A. B. D., y Syam, S. (2015). Low-temperature dilute acid hydrolysis of oil palm frond. *Chemical Engineering Communications*, 202(9), 1235–1244. Online: <https://doi.org/10.1080/00986445.2014.918881>

ASTM International. (1956). Astm d1104-56: Method of test for holocellulose in wood [Manual de software informático].

ASTM International. (2021). Astm d1107-21: Standard test method for ethanol-toluene solubility of wood [Manual de software informático].

Bali, S., Tofaneli, M. A., Ernst, R. D., y Eyring, E. M. (2012). Chromium(iii) catalysts in ionic liquids for the conversion of glucose to 5-(hydroxymethyl)furfural (hmf). *Biomass and Bioenergy*, 42, 224–227. Online: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.03.016>

Duque, A., Álvarez, C., Doménech, P., Manzanares, P., y Moreno, A. D. (2021). Advanced bioethanol production: From novel raw materials to integrated biorefineries. *Processes*, 9(2), 206. Online: <https://doi.org/10.3390/pr9020206>

Dussan, K., da Silva, D. V., Moraes, E., Arruda, P., y Felipe, M. (2014). Dilute-acid hydrolysis of cellulose to glucose from sugarcane bagasse. *Chemical Engineering Transactions*, 38, 433. Online: <https://doi.org/10.3303/CET1438073>

Dutta, S., y Bhat, N. S. (2022). Chemocatalytic value addition of glucose without carbon-carbon bond cleavage/formation reactions: an overview. *RSC Advances*, 12(8), 4891–4912. Online: <https://doi.org/10.1039/d1ra09196d>

El-Zawawy, W. K., Ibrahim, M. M., Abdel-Fattah, Y. R., Soliman, N. A., y Mahmoud, M. M. (2011). Acid and enzyme hydrolysis to convert pretreated lignocellulosic materials into glucose for ethanol production. *Carbohydrate Polymers*, 84(3), 865–871. Online: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.12.022>

Faba, L., Kusema, B. T., Murzina, E. V., Tokarev, A., Kumar, N., Smeds, A., y Díaz, E. (2014). Hemicellulose hydrolysis and hydrolytic hydrogenation over proton- and metal-modified beta zeolites. *Microporous and Mesoporous Materials*, 189, 189–199. Online: <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2013.08.011>

- Hoang, A. T., Nizetic, S., Ong, H. C., Chong, C. T., Atabani, A. E., y Pham, V. V. (2021). Acid-based lignocellulosic biomass biorefinery for bioenergy production. *Journal of Environmental Management*, 296, 113194. Online: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113194>
- Kumneadklang, S., O-Thong, S., y Larpiattaworn, S. (2019). Characterization of cellulose fiber isolated from oil palm frond biomass. *Materials Today: Proceedings*, 17, 1995–2001. Online: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.247>
- Liu, C., Zhang, C., Liu, K., Wang, Y., Fan, G., Sun, S., ... Li, Y. (2015). Aqueous-phase hydrolysis of glucose to value-added chemicals and biofuels. *Biomass and Bioenergy*, 72, 189–199. Online: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.11.005>
- Loow, Y.-L., Wu, T. Y., Jahim, J. M., Mohammad, A. W., y Teoh, W. H. (2016). Typical conversion of lignocellulosic biomass into reducing sugars using dilute acid hydrolysis and alkaline pretreatment. *Cellulose*, 23(3), 1491–1520. Online: <https://doi.org/10.1007/s10570-016-0936-8>
- Loow, Y.-L., Wu, T. Y., Tan, K. A., Lim, Y. S., Siow, L. F., Jahim, J. M., ... Teoh, W. H. (2015). Recent advances in the application of inorganic salt pretreatment for transforming lignocellulosic biomass into reducing sugars. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 63(38), 8349–8363. Online: <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5b01813>
- Lu, F., Rodriguez-Garcia, J., Van Damme, I., Westwood, N. J., Shaw, L., Robinson, J. S., y Warren, G. (2018). Valorisation strategies for cocoa pod husk and its fractions. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 14, 80–88. Online: <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2018.07.007>
- Millati, R., Trihandayani, y Cahyanto, M. (2011). Ethanol from oil palm empty fruit bunch via dilute-acid hydrolysis and fermentation. *Agricultural Journal*, 6, 54–59.
- Ministerio de Electricidad y Energía Renovable del Ecuador. (2014). *Atlas bioenergético del ecuador*. Online: <https://n9.cl/9x1ls>
- National Renewable Energy Laboratory. (2008). *Determination of structural carbohydrates and lignin in biomass* (Inf. Téc. n.º NREL/TP-510-42618). NREL.
- Odalanowska, M., Skrzypczak, A., y Borysiak, S. (2021). Innovative ionic liquids as functional agent for wood-polymer composites. *Cellulose*, 28(16), 10589–10608. Online: <https://doi.org/10.1007/s10570-021-04190-1>
- Okolie, J. A., Nanda, S., Dalai, A. K., y Kozinski, J. A. (2021). Chemistry and specialty industrial applications of lignocellulosic biomass. *Waste and Biomass Valorization*, 12(5), 2145–2169. Online: <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01123-0>
- Oliveira, L., Cordeiro, N., Evtuguin, D. V., Torres, I. C., y Silvestre, A. J. D. (2007). Chemical composition of different morphological parts from banana plant. *Industrial Crops and Products*, 26(2), 163–172. Online: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2007.03.002>
- Roslan, N. S. H. C., y Salimi, M. N. (2020). Glucose production from sugarcane bagasse by two stages chemical pretreatment and hydrolysis. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 743, 012037. Online: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/743/1/012037>
- Samah, O., Sias, S., Hua, Y., y Hussin, N. (2011). Production of ethanol from cocoa pod hydrolysate. *ITB Journal of Science*, 43, 87–94. Online: <https://doi.org/10.5614/itbj.sci.2011.43.2.2>
- Sathendra, E. R., Gurunathan, B., y Ramanujam, P. K. (2019). Production of bioethanol from lignocellulosic banana peduncle waste. *Journal of Environmental Biology*, 40, 769–774. Online: [https://doi.org/10.22438/jeb/40/4\(SI\)/JEB_18](https://doi.org/10.22438/jeb/40/4(SI)/JEB_18)
- Shet, V. B., Sanil, N., Bhat, M., Naik, M., Mascarenhas, L. N., Goveas, L. C., ... Aparna, A. (2018). Acid hydrolysis optimization of cocoa pod shell using response surface methodology. *Agriculture and Natural Resources*, 52(6), 581–587. Online: <https://doi.org/10.1016/j.anres.2018.11.022>
- Sun, S., Sun, S., Cao, X., y Sun, R. (2016). The role of pretreatment in improving the enzymatic hydrolysis of lignocellulosic materials. *Bioresource Technology*, 199, 49–58. Online: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.08.061>
- TAPPI. (2002). T 212: One percent sodium hydroxide solubility of wood and pulp [Manual de software informático].

TAPPI. (2006). T 222 om-02: Acid-insoluble lignin in wood and pulp [Manual de software informático].

Thompson, L. C., Ciesielski, P. N., Jarvis, M. W., Mukarakate, C., Nimlos, M. R., y Donohoe, B. S. (2017). Estimating the temperature experienced by biomass particles during fast pyrolysis. *Energy & Fuels*, 31(8), 8193–8201. Online: <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b00791>

Yáñez-Iñiguez, L., Urgilés-Urgilés, E., Zalamea-León, E., y Barragán-Escandón, A. (2020). Potential from forestry waste for the contribution to the urban energy matrix. *La Granja: Revista de Ciencias*

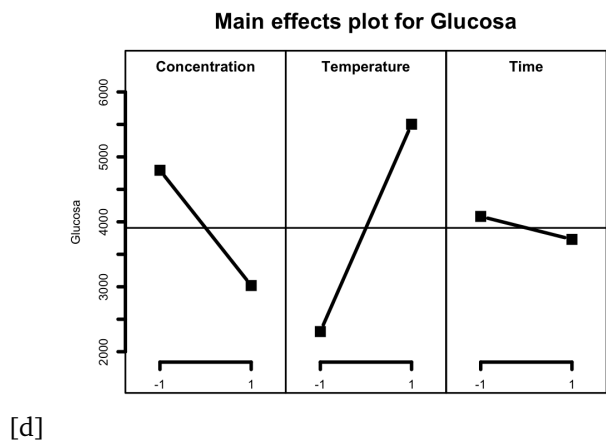
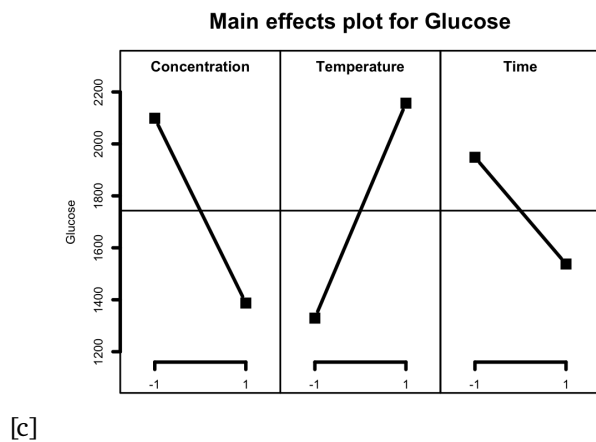
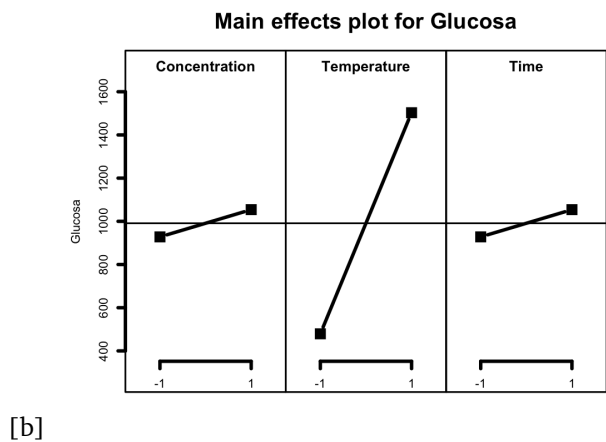
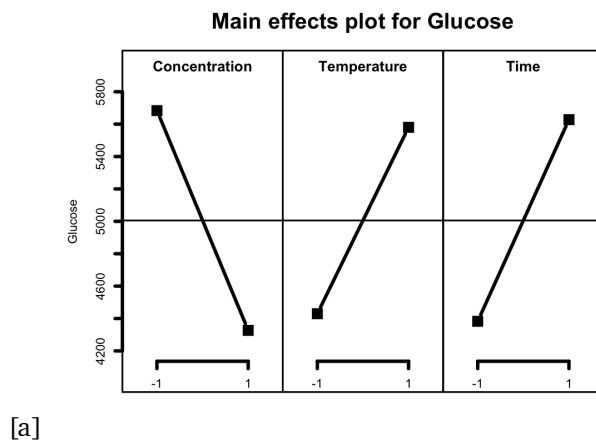
de la Vida, 32(2), 42–53. Online: <https://doi.org/10.17163/lgr.n32.2020.04>

Yogalakshmi, K. N., Devi, P. T., Sivashanmugam, P., Kavitha, S., Kannah, Y. R., Varjani, S., ... Banu, R. J. (2022). Lignocellulosic biomass-based pyrolysis: A comprehensive review. *Chemosphere*, 286, 131824. Online: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131824>

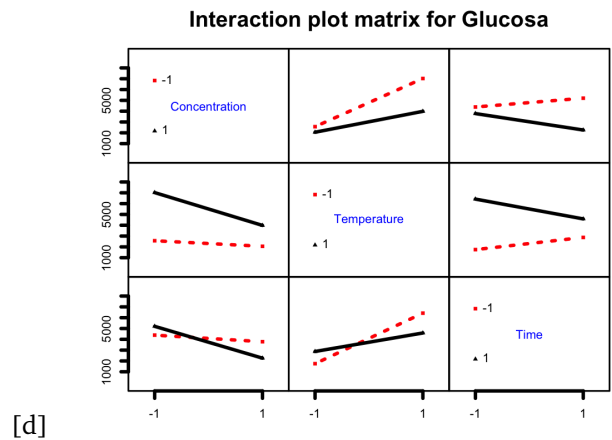
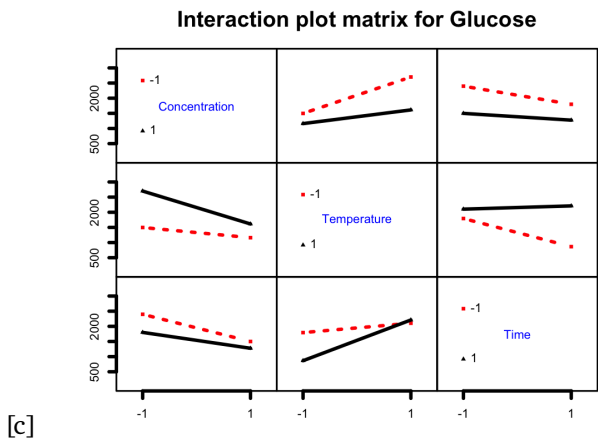
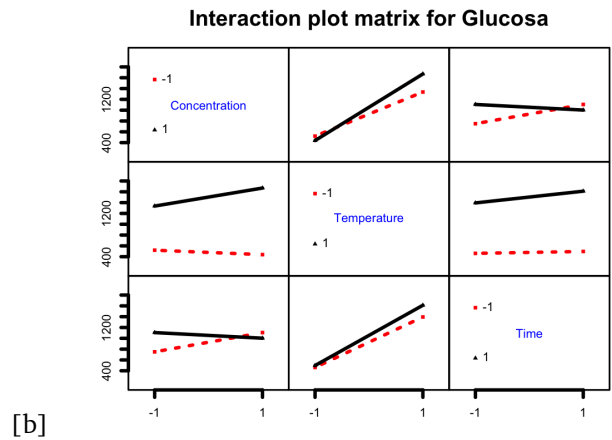
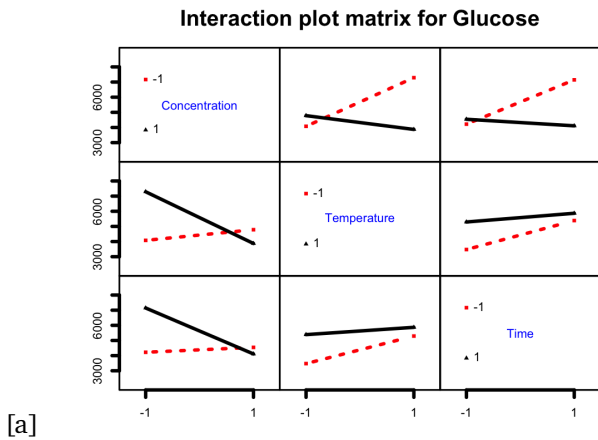
Yuan, X., Chen, X., Shen, G., Chen, S., Yu, J., Zhai, R., ... Jin, M. (2022). Densifying lignocellulosic biomass with sulfuric acid provides a durable feedstock. *Renewable Energy*, 182, 377–389. Online: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.10.015>

Apéndice

S1. Main effects: a) sugarcane bagasse, b) banana rachis, c) cocoa pod y d) African palm.



S2. Interaction effects: a) sugarcane bagasse, b) banana rachis, c) cocoa pod y d) African palm.



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/>> 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 <https://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: <https://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 expondrá 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 <<https://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 AUTOMÁTICO 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

Calidad de vida, desarrollo y responsabilidad social, cambio climático y medioambiente



“Camino hacia las Alturas”

La grandeza de la naturaleza nos recuerda lo pequeños que somos y lo infinito que podemos soñar.

Autor: ©Jonathan González Chuqui (2026)

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. 24 años de edición y 310 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, ESCI, Emerging Sources Citation Index ESCI de la Web of Science, MIAR, EBSCO, 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 asegura 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, Plagiarisma.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.

