

Vol. 16, Núm. 2 (2024)

aci

avances
en ciencias e
ingenierías

MAÍZ

Ciencia y tecnología
para el desarrollo
agrícola latinoamericano



aci

avances
en ciencias e
ingenierías

ACI Avances en Ciencias e Ingenierías es una revista científica internacional multidisciplinar de acceso abierto que publica contribuciones originales en inglés y español revisadas por pares en los ámbitos de las ciencias exactas, biológicas, ambientales e ingenierías, así como investigaciones interdisciplinarias en ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas (CTIM). La revista publica dos números anuales en los meses de mayo y diciembre, los cuales conforman el volumen correspondiente. Además, utiliza Open Journals System (OJS) y es publicada por USFQ Press.

Editora en jefe

Eva O.L. Lantsoght

Universidad San Francisco de Quito USFQ, Ecuador y
Delft University of Technology, Países Bajos

Editores asociados

Elisa Bonaccorso

Universidad San Francisco de Quito USFQ, Ecuador

Edgar Carrera Jarrín

Universidad San Francisco de Quito USFQ, Ecuador

Dennis Cazar Ramírez

Universidad San Francisco de Quito USFQ, Ecuador

Diego F. Cisneros-Heredia

Universidad San Francisco de Quito USFQ, Ecuador

Mateo Dávila Jativa

Universidad San Francisco de Quito USFQ, Ecuador

Oihane Fernandez Blanco

Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

Sebastián Ponce

Universidad San Francisco de Quito USFQ, Ecuador

Patricio Rojas Silva

Universidad San Francisco de Quito USFQ, Ecuador

Gabriel Trueba Piedrahita

Universidad San Francisco de Quito USFQ, Ecuador

Nicolás Vela-García

Universidad San Francisco de Quito USFQ, Ecuador

Consejo editorial

Andrea Arias

DuPont Pioneer, Estados Unidos

Carlos Ventura

The University of British Columbia, Canadá

César Costa

Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

César Iván Álvarez-Mendoza

Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador

Janio Jardán

Universidad Tecnológica Indoamérica, Ecuador

Johannio Marulanda Casas

Universidad del Valle, Colombia

John Blake

University of Florida, Estados Unidos

Luis Rincón

Universidad de Los Andes, Venezuela

Nikolay Aguirre

Universidad Nacional de Loja, Ecuador

Nora Oleas

Universidad Tecnológica Indoamérica, Ecuador

Oswaldo Morales Nápoles

Delft University of Technology, Países Bajos

Robert Cazar

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador

Ruth Mariela Alvarez

Universidad de Carabobo, Venezuela

Salvador Godoy

Instituto Politécnico Nacional, México

Santiago Ron

Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Ecuador

Yenisel Plasencia-Calaña

Maastricht University, Países Bajos

Comité científico internacional

Gabriela Guevara
Universidad Técnica de Berlín, Alemania

Patricia Conde Cespedes
ISEP - école d'ingénieurs du numérique, Francia

Howard Ramirez-Malule
Universidad del Valle, Colombia

Patrick Venail
Universidad de Ingeniería & Tecnología, Perú

Julio Valdivia-Silva
Universidad de Ingeniería & Tecnología, Perú

Paula Rojas
Universidad Adolfo Ibáñez, Chile

Luca Sorriso-Valvo
Consiglio Nazionale delle Ricerche, Italia

Rafael Angarita
Institut Supérieure d'électronique de Paris (ISEP), Francia

Oliver Merchiers
Institut national des sciences appliquées (INSA), Francia

Tiziano Perea
Universidad Autónoma Metropolitana, México

Victor Murray
Memorial Sloan-Kettering Cancer Center, Estados Unidos

Producción editorial

USFQ PRESS

Corrección de estilo y ortotipográfica

Alejandra Larrea, Doménica Aroca y Reema Azar

Diagramación

Krushenka Bayas Ramírez

Diseño de cubierta

Krushenka Bayas Ramírez

Fotografía de cubierta

Freepik

Webmaster y manejo de OJS

Scimago



Esta obra está bajo una licencia [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International \(CC BY-NC 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). El uso de nombres descriptivos generales, nombres comerciales, marcas registradas, etcétera, en esta publicación no implica, incluso en ausencia de una declaración específica, que estos nombres están exentos de las leyes y reglamentos de protección pertinentes y, por tanto, libres para su uso general.

La información presentada en esta revista es de entera responsabilidad de sus autores. USFQ PRESS presume que la información es verdadera y exacta a la fecha de publicación. Ni la editorial ni los editores ni los autores dan una garantía, expresa o implícita, con respecto a los materiales contenidos en esta obra ni de los errores u omisiones que se hayan podido realizar.

Para correspondencia, comunicarse con:

Att. Eva Lantsoght, editora en jefe
Universidad San Francisco de Quito USFQ
Calle Diego de Robles S/N Pampite. Campus Santiago Gangotena
Quito 170901, Ecuador.

Correo electrónico:

avances@usfq.edu.ec - usfqpress@usfq.edu.ec

ACI Avances en Ciencias e Ingenierías es publicada por USFQ PRESS, casa editorial de la Universidad San Francisco de Quito USFQ y es parte de las siguientes bases, catálogos e índices:

Directorios e índices de revistas académicas



Repositorios regionales y temáticos



Motores de búsqueda y grandes bases de datos



Servicios de apoyo a la publicación académica



Plataformas y directorios dedicados a la ciencia abierta y el acceso abierto



Recursos de archivo



Plataformas



Contenido

Vol. 16, Núm. 2 (2024)

Editorial

El rol vital de la conexión en red

The Vital Role of Networking

María Gabriela Albán Guíjarro

Sección B: Ciencias Biológicas y Ambientales

Evaluación de la eficiencia del Financiamiento Climático a través del Mecanismo REDD+ en Ecuador

Evaluation of the Efficiency of Climate Finance through the REDD+ Mechanism in Ecuador

Mayra Alejandra Medina Carrasco

Maíces con alto contenido de antocianina, biofortificados con zinc, provitamina A y de alta calidad de proteína en Perú

Maize with high anthocyanin, biofortified with zinc, provitamin A, and quality protein in Perú

Luis A. Narro León, Alexander Chávez Cabrera, Peter C. Piña Díaz, Fernando Escobal Valencia, Alicia E. Medina Hoyos, Teodoro P. Narro León, Roberto Alvarado Rodríguez, Kryss A. Vargas Gutiérrez, Fabian C. Velásquez Leveaú, Mercedes Escalante Vega, Gilberto A. García Pando, Pedro Carrillo Zavala, Raihil Rengifo Sánchez, Elizabeth Ricse Belen, Demetrio Flores Mendoza, Willian M. Huamanchay Rodríguez, Ronal Otiniano Villanueva

Efecto del sistema de siembra en acolchado plástico sobre el comportamiento agronómico y rentabilidad de cuatro variedades de maíz en la Sierra del Ecuador

Effect of the plastic mulch planting system on the agronomic behavior and profitability of four varieties of corn in the Sierra del Ecuador

Carlos A. Sangoquiza-Caiza, José L. Zambrano-Mendoza, Cristian R. Subía-García, Victoria López-Guerrero, Marcelo Racines-Jaramillo, Ana Pincay-Verdezoto, Chang Hwan Park

Identificación de parásitos gastrointestinales en aves acuáticas de la laguna Yahuarcocha, Imbabura, Ecuador

Identification of gastrointestinal parasites in waterfowl at Yahuarcocha lagoon, Imbabura, Ecuador

Ivi Flores Cabezas, Fernando Pazmiño Galarza, Nathaly Reyes Calupiña, Karla Mena Martínez, Augusto Luzuriaga-Neira, Leonardo Cedeño Jiménez, Nivia Luzuriaga-Neira

Evaluación de algunos atributos de la calidad física y fisiológica de semillas de maíz dulce (*Zea mays sacharata*) bajo diferentes condiciones de almacenamiento y época de cosecha

Evaluation of some physical and physiological quality attributes of sweet corn (*Zea mays sacharata*) seeds under different storage conditions and harvesting season

Liliana Atencio, José Tapia Coronado, Wilson Barragán, Emiro Suárez, Abelardo Cabadiáz, Iván Pastrana

Mejoramiento de la tolerancia a estrés hídrico en maíz en un programa de mejoramiento público

Maize drought tolerance improvement in a public breeding program

Luciana Ayelen Galizia, Fátima Palifermo, María Elena Otegui

Diagnóstico del complejo mancha de asfalto en el cultivo de maíz en el Altiplano Central de Guatemala

Prospection of Corn Tar Spot Complex at Central Highlands of Guatemala

Astrid Racancoj Coyoy, Glenda Edelmira Perez, Johny Fernando Patal Gomez

Efectividad de la fertilización líquida y bioestimulación en el rendimiento y rentabilidad del cultivo de maíz (*Zea mays* L.) para consumo en fresco

Effectiveness of liquid fertilization and bio-stimulation on yield and profitability of maize (*Zea mays* L.) for fresh consumption

Vicente Antonio Vera Bravo, Benny Avellan, Galo Alexander Cedeño García, Sofía del Rocío Velásquez Cedeño, Geoconda

Aracely López Álava, José Luis Zambrano Mendoza

La Rematriación de maíz (*Zea mays* L.) nativo para el pueblo indígena Kamëntsá-biyá, en el departamento del Putumayo, Colombia

The Rematriation of native corn (*Zea mays* L.) for the Kamëntsá-biyá Indigenous people, in the department of Putumayo, Colombia

John Fredy Hernandez Nopsa, Juliene Andrea Barreto Rojas, Manuel Alejandro Guzmán Hernández, Karen Viviana Osorio

Guerrero, Luis Felipe Rincón Manrique, Julio Ramírez Durán

Oportunidades y retos de los programas públicos y privados de mejoramiento genético de maíz en Latinoamérica, caso México

Challenges and opportunities of public and private maize breeding programs in Latin America, case Mexico

Ricardo Ernesto Preciado-Ortiz, María Gricelda Vázquez-Carrillo

Estudio de la eficiencia productiva del maíz (*Zea mays* L.) amiláceo y duro en el Ecuador

Study of the productive efficiency of amylaceous and hard corn (*Zea mays* L.) in Ecuador

Mario Caviades, Gabriela Albán, José Velásquez, Francisco Carvajal

Sección C: Ingenierías

Caracterización mecánica de un material compuesto de resina poliéster reforzado con corteza de eucalipto

Mechanical characterization of a material composed of polyester resin reinforced with eucalyptus bark

Jimmy David García Quiroz, Byron Darío Analuiza Hidalgo, Wilson Gabriel Agualongo Amangandi, Milton Xavier Remache Sasig

El rol vital de la conexión en red

María Gabriela Albán Guijarro^{1*}

¹Universidad San Francisco de Quito USFQ, Quito, Ecuador

* Corresponding author: galban@usfq.edu.ec

En el campo de la ciencia, la creación de redes se ha convertido en un mecanismo fundamental para fomentar la colaboración, facilitar la transferencia de conocimientos y acelerar la innovación. Los desafíos, particularmente los relacionados con la seguridad alimentaria, el cambio climático, la salud, la energía y la sostenibilidad, requieren una acción colectiva que trascienda disciplinas y fronteras. Es a través de redes eficaces que científicos, investigadores, formuladores de políticas y profesionales pueden abordar los complejos problemas de hoy y del futuro.

CYTED es el Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo, creado por los gobiernos de los países iberoamericanos para promover la cooperación en ciencia, tecnología e innovación. El programa incluye siete áreas temáticas que abarcan temas diversos, desde agroalimentación, salud, sociedad, energía, tecnologías de la información (TICs), hasta desarrollo industrial y sostenible. Un modelo ejemplar de cómo el trabajo en red puede impulsar el progreso es la Red Latinoamericana de Maíz. Esta iniciativa integra a diversos actores, incluidas instituciones académicas, institutos nacionales de investigación agrícola y el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT).

La ciencia agrícola es inherentemente interdisciplinaria y requiere experiencia en genética, ciencia del suelo, agronomía, ciencia del clima, economía y más. Ninguna institución o país, por sí solo, puede abordar toda la gama de desafíos que enfrenta la agricultura global. En este contexto, la Red Latinoamericana de Maíz reúne conocimientos especializados de varias instituciones, lo que permite a los científicos abordar cuestiones multifacéticas desde múltiples ángulos y facilita un enfoque más holístico para la resolución de problemas.

Los institutos nacionales proporcionan conocimientos locales cruciales, mientras que las universidades aportan investigaciones y avances tecnológicos de vanguardia. El CIMMYT, con su vasta experiencia en el mejoramiento mundial de maíz y sus fuertes vínculos con el desarrollo agrícola internacional, ofrece una perspectiva más amplia que garantiza que las innovaciones regionales estén alineadas con las mejores prácticas globales. Esto crea una sinergia que mejora el impacto de la investigación y acelera la adopción de innovaciones en el campo.

El establecimiento de redes también desempeña un papel crucial en la difusión e implementación oportuna de las innovaciones. En la ciencia agrícola, una cosa es desarrollar una nueva variedad de maíz o una nueva técnica agrícola; otra muy distinta es garantizar que estas innovaciones sean adoptadas por la comunidad de agricultores. Las redes proporcionan una plataforma para la comunicación y la divulgación, conectando a los investigadores directamente con los formuladores de políticas, los servicios de extensión y los agricultores.



Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial 4.0



Recibido /
Received:
11/11/2024

Publicado en línea /
Published online:
16/12/2024



En el caso de la Red Latinoamericana de Maíz, la integración de institutos nacionales de investigación y servicios de extensión agrícola locales asegura que los resultados de la investigación científica se comuniquen directamente a las comunidades que más los necesitan. Además, estas redes ayudan a garantizar que la ciencia y las tecnologías desarrolladas sigan siendo relevantes para las necesidades de los agricultores y la sociedad.

Las redes no solo ofrecen beneficios inmediatos; también representan una inversión en sostenibilidad a largo plazo. A medida que los desafíos continúan evolucionando, las redes contribuyen a construir la próxima generación de científicos e innovadores. La creación de redes brinda oportunidades para la investigación conjunta y, al facilitar los intercambios internacionales, la red fomenta una cultura de aprendizaje compartido y desarrollo de capacidades.

La revista *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías* se complace en promover estas iniciativas y está comprometida a contribuir al desarrollo de redes en agricultura y otros temas. Estos valores son fundamentales para nuestra comunidad y contribuyen a apoyar nuestra misión.

The Vital Role of Networking

María Gabriela Albán Guijarro^{1*} 

¹Universidad San Francisco de Quito USFQ, Quito, Ecuador

* Corresponding author: galban@usfq.edu.ec

In the ever-evolving field of science, networking has become a fundamental mechanism to foster collaboration, facilitate knowledge transfer, and accelerate innovation. Challenges, particularly those related to food security, climate change, health, energy, and sustainability, require collective action that transcends disciplines and borders. It is through effective networks that scientists, researchers, policymakers, and professionals can address the complex problems of today and the future.

CYTED is the Ibero-American Science and Technology for Development Program (Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo), created by the governments of Ibero-American countries to promote cooperation in science, technology, and innovation. The program includes seven thematic areas, which include diverse topics, ranging from agri-food, health, society, energy, and information technologies (ICTs), to industrial development and sustainable development. An exemplary model of how networking can drive progress is the Latin American Maize Network (Red Latinoamericana de Maíz). This initiative brings together various stakeholders, including academic institutions, national agricultural research institutes, and the International Maize and Wheat Improvement Center (CIMMYT).

Agricultural science is inherently interdisciplinary, requiring expertise in genetics, soil science, agronomy, climate science, economics, and more. No single institution or country, on its own, can address the full range of challenges facing global agriculture. In this context, the Latin American Maize Network brings together specialized knowledge from various institutions, enabling scientists to tackle multifaceted issues from multiple angles and facilitating a more holistic approach to problem-solving.

National institutes provide crucial local knowledge, while universities contribute cutting-edge research and technological advancements. CIMMYT, with its vast experience in global maize breeding and strong ties to international agricultural development, offers a broader perspective that ensures regional innovations align with global best practices. This creates a synergy that enhances the impact of research and accelerates the adoption of innovations in the field.

Networking also plays a crucial role in the timely dissemination and implementation of innovations. In agricultural science, developing a new variety of maize or a new farming technique is one thing; ensuring that these innovations are adopted by the farming community is quite another. Networks provide a platform for cross-institutional communication and outreach, connecting researchers directly with policymakers, extension services, and farmers.



In the case of the Latin American Maize Network, the integration of national research institutes and local agricultural extension services ensures that the results of scientific research are communicated directly to the communities that need them most. Moreover, these networks help ensure that agricultural science remains relevant to the needs of farmers and society.

Networking is not only about immediate gains; it is also an investment in long-term sustainability. As challenges continue to evolve, networks help build the next generation of scientists and innovators. Networking provides opportunities for joint research, and by facilitating international exchanges, the network nurtures a culture of shared learning and capacity building.

The journal *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías* is pleased to promote these initiatives and is committed to contributing to the development of networks in agriculture and other fields. These values are fundamental to our community and contribute to supporting our mission.

Evaluación de la eficiencia del Financiamiento Climático a través del Mecanismo REDD+ en Ecuador

Mayra Alejandra Medina Carrasco 

Universidad Andina Simón Bolívar, Quito, Ecuador

*Autor para Correspondencia / Corresponding Author, e-mail: malejandramedinac@gmail.com

Evaluation of the Efficiency of Climate Finance through the REDD+ Mechanism in Ecuador

Abstract

Climate change as a global problem requires an urgent global response. It does not respect borders and evidences social, economic, cultural and political problems, widening inequality gaps, conflicts and instability between countries. Climate finance is the cornerstone for the materialization of agreements, commitments and the fulfillment of climate goals. The research analyzes climate finance for REDD+ Ecuador under the UNFCCC, directed to PROAmazonia. To evaluate the impact of climate finance, a climate investment analysis was conducted to determine the effectiveness, efficiency and equity (3E+) of the activities carried out with these funds, through the variables: deforestation rate, stakeholders' participation and land tenure. After the conclusion of PROAmazonia activities in the period 2017-2023, the results show an increase in the rate of deforestation, which is considered one of the highest in Latin America, caused by extractive activities of oil, mining, timber, intensive agriculture, livestock. The participation of indigenous peoples and communities as the managers of forest conservation and protection has been underestimated. Land tenure security has been a slow process and is threatened by the expansion of the extractive industry. The research concludes that the outcome of the implementation of climate finance has not been successful.



Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /
Edited by:
Fernando Nicolás Vela

Recibido /
Received:
06/07/2023

Aceptado /
Accepted:
30/05/2024

Publicado en línea /
Published online:
11/07/2024

Keywords: climate change, deforestation, effectiveness, efficiency, equity

Resumen

El cambio climático como problema global requiere una respuesta urgente. No respeta fronteras y evidencia problemas sociales, económicos, culturales y políticos. Además, amplía las brechas de desigualdad, conflictos e inestabilidad entre los países. El financiamiento climático es la piedra angular para la materialización de los acuerdos, compromisos y el cumplimiento de las metas climáticas. Es por eso que la presente investigación analiza el financiamiento climático de REDD+ Ecuador bajo la CMNUCC, dirigido a PROAmazonía. Para evaluar el impacto del financiamiento climático se realizó un análisis de la inversión climática para determinar la eficacia, eficiencia y equidad (3E+) de las actividades realizadas con estos fondos, a través de las variables: tasa de la deforestación, participación de *stakeholders* y tenencia de la tierra. Una vez concluidas las actividades de PROAmazonía en el periodo 2017-2023, los resultados demuestran un incremento en la tasa de deforestación que es considerada como una de las más altas de Latinoamérica, provocada por actividades extractivistas de petróleo, minería, madera, agricultura intensiva y ganadería. La participación de los pueblos y comunidades



indígenas como los gestores de la conservación y protección de los bosques ha sido subestimada. Asimismo, la seguridad en la tenencia de la tierra ha sido un proceso lento y se ve amenazada por la expansión de la industria extractiva. La investigación concluye que el resultado de la aplicación del financiamiento climático no ha logrado los resultados esperados, ha sido poco eficaz, ineficiente e inequitativo.

Palabras clave: cambio climático, deforestación, eficacia, eficiencia, equidad

INTRODUCCIÓN

Los efectos devastadores del cambio climático se evidencian en el aumento de la temperatura promedio de la atmósfera y de los océanos, en las alteraciones en el ciclo global del agua, en la presencia cada vez más frecuente de fenómenos meteorológicos extremos, en la reducción de los volúmenes de nieve y hielo en los glaciares y cumbres montañosas, en el incremento del nivel del mar, entre otros. La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) establece una diferencia entre cambio climático atribuible a las actividades humanas que alteran la composición atmosférica y a causas naturales que provocan variabilidad climática [1]. Los dos casos provocan “variabilidad”, uno de origen natural y otro antrópica. Es altamente probable que la actividad humana sea la causa dominante del calentamiento del planeta.

Las concentraciones de los gases de efecto invernadero (GEI)¹ se incrementan rápidamente alcanzando concentraciones récords. Por ejemplo, el dióxido de carbono (CO₂) ha superado las 400 partes por millón (ppm) en comparación a las 280 ppm de la era preindustrial [2]. En el incremento de los GEI se reconocen factores de tipo social, económico y tecnológico, como el crecimiento poblacional, el aumento de la demanda per cápita de energía y recursos, el uso de tecnologías inadecuadas, entre otros. Se estima que para el año 2030 se necesitará un 50 % más de alimentos, un 45 % más de energía y un 30 % más de agua [3].

El planeta cuenta con una gran diversidad de ecosistemas terrestres y marinos que son el resultado de miles de años de interacción y evolución de factores climáticos y bióticos y tienen un papel importante en la regulación del clima. Los ecosistemas pueden ser afectados por causas naturales como huracanes, erupciones volcánicas y especialmente por causas antropogénicas como la deforestación, incendios, agricultura intensiva, industria, infraestructura, transporte, actividades extractivas, entre otras [2].

Los ecosistemas forestales participan en la lucha contra el cambio climático mediante la absorción de carbono, a través del proceso de la fotosíntesis que se almacena en el tronco, ramas, raíces y suelo. En los bosques boreales del extremo norte y las pluviselvas tropicales se alberga una enorme biodiversidad, con más de 60.000 especies arbóreas diferentes que ofrecen hábitats para el 80 % de especies de anfibios, el 75 % de especies de aves, el 68 % de mamíferos y un 60 % de las plantas vasculares [6]. La conservación de

1 Los gases de efecto invernadero (GEI) son gases que atrapan el calor en la atmósfera y su efecto en el cambio climático depende de la cantidad de gases, el tiempo que permanecen en la atmósfera y cómo afectan la temperatura global [4]. El CO₂ es el principal GEI emitido por las actividades antropogénicas y constituye alrededor del 65 % de las emisiones globales de GEI [1]. A su vez, las tres cuartas partes de las emisiones antropogénicas de GEI provienen de los países industrializados [5].



un gran porcentaje de la biodiversidad depende del cuidado y buen uso de los bosques. Con esta premisa, es necesario un enfoque global de la protección y conservación de los bosques entre los gobiernos de las diferentes naciones del mundo, las organizaciones internacionales y la sociedad civil.

Por este motivo, la CMNUCC creó el mecanismo de Reducción de las Emisiones debidas a la Deforestación y la Degradación Forestal, que incluye la conservación, el manejo sostenible y el mejoramiento de las reservas de carbono de los bosques (REDD+). Dicho mecanismo busca desacelerar, frenar, revertir la pérdida de los bosques, garantizar la conservación de la biodiversidad y el bienestar de las comunidades que viven en ellos [7].

La necesidad de una solución a la deforestación y degradación forestal ha motivado una discusión internacional sobre el financiamiento climático, aun cuando hasta la actualidad no se ha llegado a una definición y a un acuerdo consensuado sobre el tema. Los recursos financieros no solo son necesarios para contribuir al progreso sostenible de los países en desarrollo, sino también para adaptar los efectos adversos y disminuir los impactos climáticos. En este contexto, el financiamiento para Latinoamérica en el periodo comprendido entre 2020 y 2003, se ha concentrado principalmente en dos países: Brasil (USD 1.159 millones) y México (USD 540 millones), que han recibido conjuntamente el 41 % del total de USD 4.200 millones del financiamiento climático para la región. Las actividades de mitigación como la protección de bosques y la reforestación son las que más fondos han recibido en comparación con las actividades de adaptación, con USD 3.100 millones y USD 500 millones respectivamente. En el año 2020, el Fondo Verde para el Clima (GCF por sus siglas en inglés), fue el mayor proveedor de financiamiento climático para la región con USD 1.172 millones y destinó USD 458 millones para Pago por Resultados (PPR) de REDD+ [8]. El PPR son fondos financieros que REDD+ destina a los resultados de las actividades climáticas y son objeto de medición, notificación y verificación de los GEI a nivel nacional [7].

Ecuador se ha comprometido a promover sistemas de producción sostenible e incentivar la restauración de áreas deforestadas y degradadas, con el propósito de conservar los bosques mediante el acceso al financiamiento internacional y con la participación de diversos actores del sector público, privado, nacionalidades indígenas y organismos no gubernamentales (ONG). En la actualidad, la principal entidad gestora del financiamiento del cambio climático es el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE)² como receptor de los recursos financieros y ejecutor de la mayoría de los proyectos.

El país se ha propuesto priorizar la reducción de la tasa de deforestación a través de una serie de políticas nacionales. El MAATE en el año 2008, lanzó el Programa Socio Bosque (PSB) como un programa de conservación de los bosques nativos y páramos que promueve la reducción de los GEI a cambio de un incentivo financiero. El PSB favoreció al Ecuador por ser uno de los países de Latinoamérica en recibir PPR a través de REDD+ [9].

En este marco, evaluar el financiamiento climático a través de REDD+ exige analizar los recursos económicos recibidos hasta el año 2023 que asciende a USD 145.8 millones y que han sido destinados para reducir la deforestación y degradación de los bosques.

2 En marzo del año 2020, mediante Decreto Ejecutivo Nro.1007, el expresidente Lenin Moreno ordenó la fusión del Ministerio del Ambiente (MAE) y la Secretaría del Agua (Senagua) creando el Ministerio de Ambiente y Agua (MAAE) y en junio del año 2021, mediante Decreto Ejecutivo Nro. 59, el expresidente Guillermo Lasso redenomina a esta cartera de Estado como Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE).



Estos recursos provienen de los fondos del GCF, Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF por sus siglas en inglés) y del cofinanciamiento³ reportado entre el MAATE, Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG)⁴, Programa de las Naciones Unidas (PNUD) y Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO).

El propósito de la investigación no es una evaluación sobre los cambios en las emisiones de carbono sino un análisis de la eficacia, eficiencia y equidad (3E+) de los fondos financieros REDD+ dirigido al Programa Integral Amazónico de Conservación de Bosques y Producción Sostenible (PROAmazonía) mediante las variables: tasa de deforestación, participación de *stakeholders*⁵ y tenencia de la tierra.

ESTADO DE LA CUESTIÓN

Según el informe Stern [12]: *Economía del Cambio Climático*, disminuir las emisiones de los GEI mediante la reducción de la deforestación tendría un costo promedio de entre uno y dos dólares por tonelada de CO₂, estimación aparentemente barata en comparación con otras opciones de mitigación. El informe de Stern introduce por primera vez los conceptos de eficacia, eficiencia y equidad conocidos como los criterios 3E. Este enfoque amplió la perspectiva hacia un mecanismo que genere incentivos suficientes para frenar la deforestación y consecuentemente reducir las emisiones globales de los GEI.

El objetivo del informe fue diseñar políticas y proyectos viables para lograr efectividad climática, eficiencia de costos y resultados en términos de equidad (3E), al adicionarse el símbolo “+” a los tres criterios, se hizo referencia a los cobeneficios en la biodiversidad: reducción de la pobreza, generación de medios de vida sostenibles, gobernanza, derechos y participación comunitarios, tenencia y mejoramiento de los servicios ecosistémicos no relacionados con el carbono. Estos criterios, conocidos como los 3E+ [13], ayudan a evaluar los esquemas de reducción de los GEI al menor costo posible y contribuir al desarrollo sostenible, ya que lo ideal es que un proyecto REDD+ cumpla con los 3E+ [14].

En este marco, la “eficacia” hace referencia a la cantidad de emisiones reducidas de GEI como resultado de las actividades del mecanismo REDD+. Depende de varios factores como la viabilidad política, la gobernanza y el compromiso de los países para implementar el mecanismo. También de otras consideraciones como el control o evasión de fugas, corrupción, permanencia, responsabilidad y el alcance de las principales causas de la deforestación y degradación [15].

La eficiencia se enfoca a las reducciones de emisiones al menor costo y tiempo posible. Dentro de REDD+ se consideran varios costos: costo de desarrollo de capacidades (diseño del esquema, infraestructura técnica, capacitación); costo de funcionamiento (supervisión,

3 “El cofinanciamiento es una práctica en la que múltiples entidades financian el mismo proyecto. El cofinanciamiento puede ser proporcionado por el desarrollador del proyecto o por entidades externas. Un plan de cofinanciamiento sólido (ya sea en especie o en efectivo) es una prueba del amplio interés en el proyecto por parte de una diversidad de actores relevantes y, por lo tanto, es una característica importante del diseño de un proyecto” [10]. También se define como un “préstamo otorgado a los países en desarrollo por los bancos comerciales y otras instituciones crediticias, en asociación con el Banco Mundial y otros bancos multilaterales de desarrollo” [11].

4 En marzo del año 2017, mediante Decreto Ejecutivo Nro. 207, el expresidente Lenin Moreno modifica la denominación del Ministerio de Agricultura, Ganadería Acuacultura y Pesca (MAGAP) por Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG).

5 Se usa el término en inglés porque no existe una traducción satisfactoria en castellano.



aplicación de la política forestal y de la tenencia de la tierra); costo de implementación asumidos por los propietarios de la tierra, administradores y usuarios de los bosques. “Todos estos, excepto los de compensación y renta, son costos de transacción” [15].

Por otro lado, la “equidad” dentro de las propuestas de REDD+ incluye objetivos que no están vinculados con el cambio climático sino que tienen una connotación con dimensiones sociales y ambientales como la distribución de beneficios, los medios de vida, la reducción de la pobreza, la tenencia de la tierra, la protección de los derechos y participación de los pueblos y comunidades indígenas, la incorporación de una perspectiva de género más justa, la biodiversidad, entre otras [15].

Al analizar los criterios 3E+ en un proyecto, se observan resultados contrapuestos entre ellos. Por ejemplo, un proyecto de REDD+ puede dar buenos resultados a gran escala con un costo relativamente bajo, pero genera un incremento en la desigualdad en la propiedad de la tierra. Otro ejemplo, un proyecto dirigido a la comunidad para fortalecer los derechos locales de la tenencia de la tierra puede obtener logros de equidad, pero ser costoso y de larga duración (ineficiente) [16].

MATERIALES Y MÉTODOS

El punto de partida es el financiamiento climático bajo la CMNUCC a través de los fondos GCF y GEF dirigidos a PROAmazonía, en el compromiso de retribuir a Ecuador por conservar los bosques. La información del cofinanciamiento de otras fuentes no es objeto de análisis de la investigación, pero se la menciona para complementar la información del total del financiamiento climático del periodo 2017-2023.

El estudio tiene como base una variedad de fuentes bibliográficas que incluye: artículos científicos, informes de financiamiento climático, informes de los proyectos de los fondos del GCF y del GEF, entrevistas semiestructuradas a académicos, especialistas en materia ambiental y expertos en financiamiento climático (Tabla 1), orientadas a obtener datos e información sobre las acciones realizadas dentro de los proyectos de REDD+. La selección de los entrevistados se efectuó en función de su participación dentro de la Mesa de Trabajo REDD+ (MdT), así como por la experiencia en materia ambiental, y los conocimientos técnicos y socioeconómicos que avalan la implementación de los proyectos en territorio. La respuesta de los entrevistados fue un conjunto de datos no estructurados, variados y críticos, cada uno con su propia perspectiva; información a la que se le dio una estructura y permitió ampliar el análisis.

Para profundizar el análisis de los criterios eficacia, eficiencia y equidad (3E+) se realizó un estudio de las variables: 1. tasa de deforestación; 2. participación de *stakeholders*; y 3. tenencia de la tierra. Se elaboró un análisis de las variables mediante literatura relevante e información de las entrevistas; tarea compleja considerando que la dinámica de estas variables son fenómenos que se han dado bajo contextos sociales, políticos, económicos e institucionales heterogéneos.



Tabla 1. Entrevistas a académicos y expertos

Entrevistado	Cargo	Representante
Arild Angelsen	Profesor de Economía en la Norwegian University of Life Sciences (NMBU)	Academia
Carolina Rosero	Gerente de Políticas Ambientales de Conservación Internacional (CI)	ONG
Cristina García Soto	Oficial de Programa de Bosques y Agua de WWF	ONG
David Romo Vallejo	Director del Programa de Diversidad Étnica de la Universidad San Francisco de Quito (USFQ)	Academia
David Yedra	Director de Gestión Ambiental de GAD de Provincial de Pastaza	GAD
Duval Llaguno Rivadeneira	Especialista en Recursos Naturales del Banco Interamericano de Desarrollo (BID)	BID
Francisco Moscoso Silva	Especialista Técnico en Monitoreo y Seguimiento de PROAmazonía	PROAmazonía
Jaime Toro Guajala	Director de Naturaleza y Cultura Internacional (NCI)	ONG
Jessica Gallegos	Especialista de Mitigación de Cambio Climático del MAATE	MAATE
Manuel Shiguango	Técnico Territorial CONFENIAE/ONU REDD+	CONFENIAE/ONU REDD+
Patricia Serrano	Gerente de PROAmazonía	PROAmazonía

Elaboración propia.

Para la evaluación de la deforestación se revisó la tasa de deforestación nacional, mediante un análisis histórico comparativo desde el año 1990 hasta el año 2022 para examinar los resultados alcanzados por los proyectos financiados por el GCF y GEF. Los resultados de la deforestación de los proyectos bajo estos fondos provocan cierta incertidumbre por factores como la reducida información de datos y cifras actualizadas. Esta variable permite cuantificar la eficacia y eficiencia de las actividades de REDD+.

En cuanto a la participación de *stakeholders* se realizó un mapeo sobre la intervención de los actores involucrados, dirigido a obtener datos e información sobre las acciones realizadas por PROAmazonía. La selección de los entrevistados se hizo en función de su participación dentro de la MdT, por la experiencia en materia ambiental, y los conocimientos técnicos y socioeconómicos que avalan la implementación de los proyectos en territorio. El análisis de la investigación se centra en la participación de los pueblos y comunidades indígenas como socio estratégico para la implementación de las acciones de REDD+.

Con el fin de evaluar la tenencia de la tierra se revisó literatura oficial y académica. Además, se reforzó con las entrevistas realizadas. Se consideró esta variable en razón de que los derechos sobre la tierra son un requisito previo para acceder a los beneficios de REDD+. La tenencia de la tierra es la base sobre la que se consolidan los proyectos y la distribución de los beneficios. Estas dos últimas variables, la participación de *stakeholders* y la tenencia de la tierra, permiten cuantificar la equidad.



ANÁLISIS Y RESULTADOS

En el año 2017, bajo la iniciativa del MAATE, MAG, PNUD y con el financiamiento de los fondos GCF y GEF, se implementó PROAmazonía, cuyos objetivos son: vincular los esfuerzos nacionales para reducir los GEI por deforestación y el crecimiento de la frontera agrícola y ganadera; fortalecer los esfuerzos de mitigación, adaptación y la protección a los bosques; reducir los niveles de la pobreza; y, lograr el desarrollo humano sostenible. PNUD es el responsable de la gestión financiera de los recursos de los fondos por su experiencia en la administración, asistencia técnica y ejecución de los proyectos y el MAATE y MAG como ejecutores de los proyectos [17].

PROAmazonía se financió con fondos no reembolsables del GCF y GEF hasta el año 2023, con un presupuesto total de USD 145.8 millones. De los mismos, USD 53.6 millones fueron entregados en dinero y USD 92.2 millones se colocaron como contraparte nacional y de cooperación en especies (sueldos y salarios, pago a beneficiarios del PSB, arriendos, equipos e insumos) [18].

PROAmazonía trabaja en la Amazonía Norte en 25 paisajes⁶ en 8 provincias: cinco paisajes en Sucumbíos, cinco en Orellana, cinco en Morona Santiago, cuatro en Pastaza, dos en Zamora Chinchipe, dos en Loja, uno en Napo y uno en El Oro. El área de acción del proyecto GCF son las 6 provincias amazónicas, más la provincia de Loja en los andes y El Oro en la costa. En el caso del proyecto GEF son los paisajes norte (cantones Shushufindi y Orellana), centro (cantón Taisha), y sur (cantones Morona y Nangaritza). Los criterios de priorización para la definición de estos paisajes están relacionados con áreas de mayor riesgo de deforestación, áreas de importancia para el mantenimiento de los recursos hídricos y la biodiversidad (conectividad) y áreas de importancia para la reducción de la pobreza y diversificación de la economía rural [19].

Patricia Serrano, gerente de PROAmazonía, sostiene que: “el programa apunta a la convergencia de la agenda ambiental y productiva, genera oportunidades y promueve la participación plena y efectiva de los pueblos y comunidades indígenas, en la toma de decisiones de los procesos encaminados hacia la sostenibilidad”. Enfatiza que, en la estrategia financiera del Plan de Acción REDD+ Ecuador “Bosques para el Buen Vivir” 2016-2025 (PA REDD+)⁷, “existe una brecha financiera para ejecutar todo el plan, PROAmazonía implementa una parte del plan”, pero hacen falta más recursos financieros, se deben buscar otras alternativas para apalancar más fondos climáticos que permitan continuar con el plan.

Fondos bajo la CMNUCC

El aporte del GCF está dirigido a cofinanciar el PA REDD+ como un conjunto de líneas estratégicas para promover acciones de mitigación al cambio climático. Con aproximadamente el 26 % del presupuesto, ayuda a garantizar que los instrumentos financieros estén alineados con los objetivos del PA REDD+ y controlar la expansión agrícola en las zonas forestales [20].

6 “Paisaje es cualquier parte del territorio tal como la percibe la población, cuyo carácter es el resultado de la acción y la interacción de factores naturales y/o humanos. Cada uno de los atributos que componen un paisaje, se pueden clasificar por elementos bióticos como vegetación, fauna, usos del suelo, relieve, agua, etc. De la combinación de todas ellas se configura el paisaje” [21].

7 El PA REDD+ es un conjunto de líneas estratégicas para promover acciones de mitigación del cambio climático. El mecanismo financia programas orientados a la reducción de la deforestación mediante estrategias de evaluación y seguimiento a través de los Niveles de Referencia de Emisiones Forestales (NREF), el Sistema de Monitoreo, Reporte y Verificación (SMRV) y el Sistema de Salvaguardas, Sociales y Ambientales (SSA) [22].



Los fondos están destinados al proyecto denominado “Promoción de instrumentos financieros y de planificación del uso del suelo para la reducción de emisiones y deforestación”, que tiene un monto aprobado de USD 41.2 millones. El plan de financiamiento del proyecto se muestra en la Tabla 2. La inversión del GCF cubre el 16.4 % de las necesidades financieras del proyecto [20].

Tabla 2. Plan de Financiamiento GCF

Financiamiento	Monto	Monto total
GCF Fondo fiduciario		USD 41.172.739
Cofinanciamiento total		USD 42.835.908
MAATE	USD 31.755.550	
MAG	USD 8.490.000	
FAO	USD 820.900	
PNUD	USD 1.769.458	
Total		USD 84.008.647

Fuente: GCF [23]. Elaboración propia.

El fondo del GEF a través de la articulación de políticas intersectoriales y gubernamentales destina su inversión al proyecto denominado “Manejo integrado de paisajes de uso múltiple y alto valor de conservación para el desarrollo sostenible de la región amazónica ecuatoriana”. El proyecto tiene un monto aprobado de USD 12.5 millones y se ejecuta mediante el trabajo coordinado entre el MAATE y MAG, con una línea de tiempo desde el año 2017 al 2023. El plan de financiamiento del proyecto financiado por el GEF se desglosa en la Tabla 3 [24].

La inversión del fondo GEF para el proyecto es de USD 12.5 millones más un aporte paralelo de USD 49.3 millones por parte del gobierno, PNUD, ONG, sector privado, academia y el Banco de Desarrollo Internacional, con un total de USD 61.8 millones. El cumplimiento del cofinanciamiento es monitoreado por el PNUD y reportado al GEF [24].

Tabla 3. Plan de Financiamiento GEF

Financiamiento	Monto	Monto total
GEF Fondo fiduciario		USD 12.462.500
Cofinanciamiento total		USD 49.338.351
Gobierno	USD 34.347.440	
PNUD	USD 1.000.629	
ONG	USD 3.600.000	
Sector privado	USD 1.986.008	
Academia	USD 4.453.804	
Banco de Desarrollo Internacional	USD 3.950.470	
Total		USD 61.800.901

Fuente: GEF [24]. Elaboración propia.



A partir del año 2020, PROAmazonía ha intensificado sus acciones en territorio, superando los obstáculos ocasionados por la pandemia, con el fin de alcanzar los logros establecidos. En un inicio el presupuesto del Programa se estructuró por componentes, pero desde el año 2022 se realizaron modificaciones para desagregar los presupuestos y visibilizar las intervenciones por provincias.

David Romo, director del Programa de Diversidad Étnica de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, manifiesta que las actividades que abarca el proyecto exigen una alta inversión financiera y hay una brecha entre los presupuestos programados, ejecutados y comprometidos: “desde el inicio del proyecto la gestión ha sido lenta, el proceso de aprobación llevó mucho tiempo desde junio del año 2017 hasta el primer trimestre del año 2018”. Además, agrega que la sostenibilidad del proyecto es intermedia considerando la situación económica, los riesgos políticos y sociales del país: “no existe un empoderamiento del programa por parte de los Ministerios, esto ha sido un inconveniente para el logro de los resultados”.

VARIABLES DE ANÁLISIS

Para la evaluación del financiamiento climático de los proyectos del mecanismo REDD+ Ecuador bajo los criterios 3E+ la investigación se apoyó en: 1. la tasa de deforestación para valorar la eficacia y eficiencia; 2. la participación de *stakeholders* y 3. la tenencia de la tierra para valorar la equidad.

Tasa de Deforestación

La tasa de deforestación hace referencia al cambio permanente de la superficie forestal entre un periodo de tiempo y otro subsecuente causado por el ser humano [25]. “La deforestación sucede porque es rentable para alguien. Hay mucho dinero en la tala de árboles, sobre todo para convertir la tierra en campos agrícolas. Y la idea de que REDD+ debe cambiar la ecuación al hacer que un árbol vivo sea más valioso que un árbol muerto costará mucho dinero si se quiere hacer realmente” [26].

REDD+ abordó incentivos económicos para cambiar el enfoque de los tenedores de los bosques. La protección de los bosques significa dejar de percibir ingresos por evitar la explotación de este recurso, en otros términos, la conservación de los bosques es más rentable que la tala, la agricultura y la ganadería para recibir PPR. Bajo este esquema, los propietarios conservan los bosques porque tendrán mayores ingresos, esta connotación marcó la diferencia con acciones anteriores [27].

Las lecciones aprendidas han demostrado que los recursos económicos por si solos no detienen la deforestación, REDD+ no ha abordado las causas reales de la deforestación a gran escala y no está contribuyendo a la protección del clima porque detener la deforestación no es un proceso rápido, fácil ni barato. Además, tras el postulado del mecanismo se detecta el propósito de camuflar las intenciones de los países desarrollados en la protección de los bosques tropicales, transformando las subvenciones destinadas a “la ayuda al desarrollo” en préstamos a proyectos y programas climáticos [28].



Tabla 4. Cobertura vegetal y la tasa de deforestación 1990-2018

Año	Deforestación bruta anual promedio (ha/año)	Regeneración bruta anual promedio (ha/año)	Deforestación neta anual promedio (ha/año)	Tasa anual de deforestación bruta (%)	Tasa anual de deforestación neta (%)
1990-2000	129.943	37.201	92.742	-0.93	-0.65
2000-2008	108.666	30.918	77.748	-0.82	-0.58
2008-2014	97.918	50.421	47.497	-0.77	-0.37
2014-2016	94.353	33.241	61.112	-0.74	-0.48
2016-2018	82.529	24.100	58.429	-0.66	-0.46
2018-2020	91.692	4.158	87.535	-0.75	-0.76
2020-2022	95.570	2.547	93.023	-0.78	-0.76

Fuente: MAATE [29]. Elaboración propia.

Los resultados de la deforestación y regeneración forestal (Tabla 4), según los datos históricos promedios y tasas anuales muestran que la deforestación neta (diferencia entre la deforestación bruta y la regeneración) ha disminuido en el periodo 1990-2018; sin embargo, en el periodo 2018-2022 se ha incrementado significativamente.

A nivel regional, estas cifras en términos de extensión total deforestada ubican al país en el quinto lugar después de Brasil, Bolivia, Perú y Colombia. Ecuador, por su tamaño territorial, pierde sus bosques a mayor velocidad por la expansión de la frontera agrícola y ganadera, el desarrollo de infraestructura, la explotación minera y de hidrocarburos y la extracción de recursos madereros [30].

En el Ecuador los principales focos de deforestación se encuentran en el Chocó-Darién y en la cuenca amazónica. El Chocó-Darién, conocido por ser una de las zonas más ricas en biodiversidad y por tener alta tasa de endemismo, está altamente deforestado en el lado ecuatoriano [31]. La amazonia central, en comparación con el Chocó-Darién, presenta una menor tasa de deforestación pese a que también ha experimentado una constante disminución de sus bosques [32]. También preocupa la tasa de deforestación de algunas áreas protegidas, por ejemplo, la reserva ecológica Mache-Chindul ubicada en la costa ecuatoriana ha perdido el 39 % de sus bosques [33].

Solo dos de las seis provincias amazónicas del país representa el 46 % que corresponde a las 287.000 hectáreas de toda la deforestación detectada entre los años 2001 y 2020. En Morona Santiago se perdieron más del 25 % del bosque, lo que representa 158.000 hectáreas y, en Sucumbíos, cerca del 21 % equivalente a 129.000 hectáreas. En las dos provincias existe la presencia de actividades extractivas como la minería e hidrocarburos. De mantenerse la actual tasa de deforestación, en un lapso de treinta años se habrán perdido importantes áreas forestales originales [30].

Manuel Shiguango, técnico territorial CONFENIAE / ONU REDD+, manifiesta que un motivo de preocupación del proyecto que financia el GEF es:



El énfasis que se ha puesto en la transformación del sector productivo a través de prácticas sostenibles de manejo forestal, ¿qué tipo de prácticas sostenibles es lo que se pretende introducir? ¿acaso se trata de plantaciones de árboles, confiando en especies de rápido crecimiento como el eucalipto, palma, soja y plantaciones de monocultivo?.

Agrega que se debe trabajar en la restauración de las funciones ecológicas de los bosques: “el tema ausente es la necesidad de reducir el sobreconsumo y la producción industrial de monocultivos destinados a la exportación con graves consecuencias para los pueblos, comunidades y los bosques”. Adiciona que la deforestación y las emisiones de los GEI continuarán si se sigue orientando el financiamiento a la transformación del uso de la tierra en paisajes seleccionados, causando más daños a los pueblos, comunidades y pequeños agricultores.

En este contexto, según Cristina García, oficial del Programa de Bosques y Agua de WWF, indica que: “medir la eficacia y la eficiencia de los proyectos financiados por el GCF y GEF sobre la tasa de deforestación es complicado”. El NREF se encuentra en proceso de revisión, al igual que los resultados oficiales de la dinámica de la deforestación del período 2015-2018. Agrega que: “la reducción de los GEI es un proceso complejo que involucra temas políticos, económicos, administrativos, técnicos, sociales, entre otros, no es un programa de infraestructura”. Los resultados más equitativos y duraderos son aquellos donde la población local participa en el diseño y en la ejecución del programa REDD+.

Patricia Serrano agrega que otro factor que ha dificultado la medición de la eficacia y eficiencia de la tasa de deforestación es que el cálculo del sistema de monitoreo se realiza a nivel nacional y no por proyectos ni por áreas, debido a que el sistema de monitoreo de bosques es nacional. Ante esto: “PROAmazonía en coordinación con el MAATE están elaborando una estimación aproximada de la deforestación anual nacional”.

Ante lo expuesto, se evidencia que los fondos de REDD+ no son eficaces ni eficientes por cualquier fuente que vengan, ya sea por donaciones, subvenciones, canje de deuda o cooperación internacional, porque no se ha logrado reducir la deforestación en los niveles esperados. Si bien es cierto, ha existido disminución en la tasa de deforestación hasta el año 2018; sin embargo, con los proyectos en ejecución, la tasa de deforestación se ha incrementado desde el año 2018 hasta el año 2022. REDD+ no ha podido abordar el problema que se suponía debía resolver: reducir la deforestación, promover la conservación, y el manejo y uso sostenible de los recursos de los bosques del país.

Participación de *stakeholders*

La participación de *stakeholders* hace referencia a los actores que están involucrados en la MdT que comprende la autoridad nacional REDD+: pueblos y comunidades indígenas, afroecuatorianos, montubios, mujeres, jóvenes, academia, sociedad civil y sector privado.

En el año 2012, se creó la MdT⁸ conformada por 41 organizaciones (Tabla 5) como una plataforma nacional de diálogo, involucramiento, participación, deliberación, consulta y seguimiento de los actores clave y cuya función es el seguimiento a la implementación de

8 La MdT inició hace 10 años. Del 2013 al 2015 fue el primer periodo, del 2016 al 2019 el segundo y del 2020 al 2023 el tercero.



medidas y acciones REDD+ en el Ecuador. Fue institucionalizada por el MAATE en el año 2017⁹ para asegurar que en las fases de preparación e implementación de REDD+ se considere la visión y aportes de todos los actores involucrados, tanto de los que tienen derechos de aprovechamiento sobre los bosques como de los agentes de causas directas y subyacentes de la deforestación y degradación de los bosques. El alcance de la MdT está direccionado a la implementación de políticas y acciones REDD+, salvaguardas sociales y ambientales (SSA) y a la rendición de cuentas y acceso a la información sobre los avances de los proyectos [19].

Tabla 5. Organizaciones de la mesa de trabajo

Sector 1		Sociedad civil
Academia	1.	Universidad Estatal Amazónica (UEA)
	2.	Universidad San Francisco de Quito (USFQ)
	3.	Pontificia Universidad Católica del Ecuador (PUCE)
	4.	Universidad Técnica Particular de Loja (UTPL)
ONG nacionales	5.	Comité Ecuatoriano de Defensa de la Naturaleza y Medio Ambiente
	6.	Conservación Internacional - CI
	7.	Grupo nacional de trabajo sobre certificación forestal voluntaria en Ecuador (CEFOVE)
	8.	Fundación Heifer
	9.	World Wild Fund - WWF
	10.	Fundación Altrópico
	11.	Fundación Ceiba
	12.	Red Internacional del Bambú y el Ratón - INBAR
	13.	Wildlife Conservation Society
	14.	Naturaleza y Cultura Internacional
	15.	Fundación Pachamama
Sector 2		Sociedad civil
Organizaciones de mujeres y jóvenes	16.	Asociación de Mujeres Waorani de la Amazonía Ecuatoriana (AMWAE)
	17.	CONFENIAE (Comisión de la mujer y salud, familia y nutrición)
	18.	Asociación de Productoras La Chakra
	19.	Red de Jóvenes Ambientalistas del Sur del Ecuador (Red JASE)
Organizaciones de mujeres y jóvenes	20.	Confederación de Nacionalidades Indígenas de la Amazonía Ecuatoriana (CONFENIAE)
	21.	Nación Originaria Quijos (NAOQUI)
	22.	Federación Provincial de la Nacionalidad Shuar de Zamora Chinchipe (FEPNASH-SCH)
	23.	Asociación de Centros Shuar de Santiago
	24.	Asociación de Mujeres Kichwa de Napo (AMUKINA)
	25.	Fundación Shiwuar Sin Fronteras (FCAE)

⁹ Al momento de la investigación, la MdT estaba en su tercer periodo de funcionamiento. Ha sesionado en 12 ocasiones de acuerdo con el modelo de gobernanza, logrando obtener varios aportes que han fortalecido la implementación de REDD+ a nivel nacional [34].



Organizaciones indígenas de la Sierra	26. Federación Interprovincial de Indígenas Saraguros (FIIS)
	27. Federación de Centro Awá del Ecuador (FCAE)
Organizaciones montubias y campesinas	28. Federación de Organizaciones Montubias del Ecuador (FEDOMECE)
	29. Unión Noroccidental de Organizaciones Campesinas y Poblaciones de Pichincha (UNOCYPP)
Comunidades locales	30. Red de Organizaciones Sociales y Comunitarias en la gestión del Agua del Ecuador - ROSCGAE
	31. Red de Comunidades de Socio Bosque de Napo
	32. Asociación de Bosques y Páramos para la Vida Imbabura
	33. Comunidad Shuar Yumisim - PSB
Sector 3 Sector privado	
Gremios nacionales	34. Asociación Ecuatoriana de Industriales de la Madera - AIMA
Asociaciones de pequeños productores	35. Consorcio Cacao y Chocolate de Napo
	36. Asociación Charolais de Morona Santiago
	37. Asociación Agro Artesanal de Productores Ecológicos - APECAP
	38. Federación de Pequeños Exportadores Agropecuarios Orgánicos del Sur de la Amazonía Ecuatoriana - APEOSAE
	39. Asociación de Productores - ASOSUMACO
	40. Unión de Productores Agropecuarios de Morona Santiago
Empresa privada	41. Verde Canandé
Sector 4 Grupos invitados	
Proyectos o programas que implementan acciones REDD+	42. Mancomunidad Bosque Seco
	43. Consorcio Público Bosque Petrificado Puyango
	44. Consorcio GS Agroforestal San Pablo del Lago
	45. Corporación de Ferias de Loja

Durante el tercer periodo de funcionamiento de la MdT ha sesionado en 12 ocasiones de acuerdo con el modelo de gobernanza; sin embargo, los territorios donde intervienen los proyectos presentan problemas que se deben resolver, como la falta de transparencia en la información de las actividades. David Yedra, director de Gestión Ambiental de GAD Provincial de Pastaza, cree que hace falta profundizar en esta temática, ya que no se ha desarrollado de manera efectiva ni equitativa la inclusión comunitaria y se debe trabajar de manera conjunta con PROAmazonía.

Por otro lado, Carolina Rosero, gerente de Políticas Ambientales de Conservación Internacional piensa que se deben fortalecer las alianzas entre actores que se involucren en los procesos a nivel social, técnico y político; en particular con líderes de las comunidades, mujeres y jóvenes, que apunten al bien común mediante espacios de articulación organizacional y territorial. Estos espacios de articulación son claves para desarrollar las estrategias, evitar conflictos y contribuir al fomento de una positiva gestión forestal acorde



a la realidad comunitaria, comprometidos con los procesos ambientales a mediano y largo plazo proyectando una sostenibilidad después del cierre de PROAmazonía.

Al parecer los resultados de las reuniones de la MdT ratifican que sus miembros trabajan en coordinación con las actividades que se realizan a través de los proyectos REDD+. Se debe trazar un plan de acción que ponga freno a la destrucción causada por la deforestación tras la expansión de las plantaciones de monocultivos agrícolas industriales, la cría industrial de ganado en los bosques, los cultivos comerciales y otras actividades que cuentan con el apoyo de corporaciones globales de alimentos a través de la vinculación a normas de certificación que promueve REDD+.

La crítica a REDD+ se ha dado porque desde el inicio y en el proceso de construcción, los recursos financieros se han destinado para definir el NREF, SMRV y SSA descuidando la participación y consulta a los pueblos y comunidades indígenas como actores relevantes. Cristina García Soto, oficial del Programa de Bosques y Agua de WWF, menciona que “las comunidades han manifestado su inconformidad con la gestión de REDD+ porque son ellos los que cuidan los bosques y no reciben la ayuda necesaria para conservarlos”.

Pese a los enunciados de REDD+, los pueblos y comunidades indígenas no han participado en las negociaciones del mecanismo, han sido los representantes de los sectores del poder los que han tomado decisiones dentro de las negociaciones climáticas. Además en la lógica del negocio de REDD+, las comunidades indígenas pasan a llamarse “proveedores de servicios” porque conservan el bosque que es el que genera los servicios ecosistémicos, el bosque pasa a ser un bien intercambiable que como un bono, puede ser vendido, alquilado e invertido dentro del mercado del carbono [35].

El país ha tenido que solventar una serie de dificultades para la conservación y el uso sustentable de los bosques. Las comunidades han surgido como actores políticos cuya participación ha promovido manifestaciones colectivas que pretenden lograr eficacia y legitimidad de las políticas. Sin embargo, este ideal no se ajusta a la realidad de las comunidades, lo que ha dado lugar a efectos adversos de las políticas de gestión de los recursos naturales basados en la comunidad, que se traducen en políticas vulnerables e incrementan las desigualdades existentes, con riesgo a que la mayor parte de beneficios vaya a manos de los que tienen ya los recursos y el poder sobre la toma de decisiones de la comunidad.

El Estado debe reajustar su interacción para lograr los resultados planificados. Para esto, las políticas de REDD+ precisan de la apropiación nacional y procesos políticos inclusivos a través de una definición clara de la estructura de gobernanza frente a intereses que provocan la deforestación [36]. Dichos factores claramente no han sido desarrollados en Ecuador por falta de políticas claras, ausencia de una apropiación nacional, procesos políticos complejos desarraigados de los temas sociales y ambientales que no se han desarrollados en función de los grupos vulnerables.

La Tenencia de la Tierra

La tenencia de la tierra es importante en la planificación y aplicación del mecanismo REDD+, ya que constituye la base sobre la que se construye la distribución de los beneficios y la realización de los proyectos. El mecanismo REDD+ promueve la inversión y gestión de los



bosques en áreas que por lo general están apartadas de los centros urbanos y en lugares de difícil acceso. La falta de seguridad jurídica sobre la tenencia es uno de los principales frenos para la inversión del mecanismo. Clarificar y dar seguridad sobre los derechos de tenencia de la tierra es el primer paso en el proceso de preparación REDD+ [37].

La gestión de la tenencia requiere una política pública integral y un accionar de largo plazo que incluye recursos técnicos, legales y financieros, así como la participación de varios actores que colaboren en la legalización [38]. La ley forestal no permite la existencia de propiedad privada dentro de las áreas de protección, patrimonio forestal o bosque protector que han sido declaradas en documentos. Tal disposición se realizó sin considerar la participación de los pueblos y comunidades indígenas. Por este motivo, el traslape de áreas protegidas y el desconocimiento por parte de organizaciones indígenas de algunas áreas de protección ha provocado el reclamo sobre la autonomía para el manejo de sus territorios, en razón de que muchas de ellas estaban habitadas por pueblos y comunidades indígenas antes de ser declaradas como áreas protegidas [39].

La inequidad, ilegalidad y desigualdad en la tenencia de la tierra es un problema crítico del país y una de las de las más altas de Latinoamérica, considerando el tamaño en comparación con otros países de la región. El coeficiente de Gini utilizado para medir la desigualdad en el acceso al recurso tierra señala un 0.81, que es un resultado preocupante [40].

La tenencia de la tierra es un tema controversial. En áreas protegidas existen haciendas que tienen título de propiedad, esto constituye un problema por resolver. David Romo afirma que “los propietarios de estas áreas siguen trabajando sin considerar que son áreas protegidas, generalmente esto se observa en la región sierra. Situación similar sucede con áreas de las comunidades de la Amazonía que las han declarado protegidas y de conservación como el Parque Yasuní donde se realizan concesiones petroleras”. Queda trabajo por realizar que tendrán que resolver los gobiernos de turno.

Además, la tenencia de la tierra ha estado ligada a otros factores condicionantes como la explotación petrolera y minera que han dado un giro al uso del suelo de la región amazónica y es una causa de deforestación y deterioro ambiental. La inequidad, ilegalidad, inseguridad y la falta de transparencia en la tenencia de la tierra han sido factores condicionantes de vulnerabilidad, fenómeno eminentemente social que afecta a los pueblos y comunidades indígenas y al desarrollo sostenible del país [40].

De acuerdo con Patricia Serrano: “la tenencia de la tierra no es un eje de acción de PROAmazonía”. En los proyectos financiados con fondos del GCF y GEF establecidos en el PA REDD+, el requisito previo para acceder a los beneficios es el título de propiedad o que la tierra este saneada.

Se evidencia que en los últimos años los proyectos REDD+ no han defendido y menos fortalecido los derechos de los pueblos, comunidades indígenas y de otras poblaciones dependientes de los bosques, por el contrario, han establecido nuevos paquetes de derechos de propiedad a favor de diversos actores de poder [41].

Desde el año 2008 se han creado tres políticas consecutivas en relación con la tierra: el Plan Haciendas en el año 2008, el Plan Tierras en el periodo 2009-2013 y el Plan para el Acceso



a Tierra de los Productores Familiares y la Legalización Masiva en el Territorio Ecuatoriano (ATLM) en el año 2018. Sin embargo, en el contexto de inestabilidad social y política que ha marcado al país, su aplicación ha sido poco efectiva e inequitativa por factores como: la poca participación de los actores involucrados, el limitado conocimiento del territorio, la falta de estudios de viabilidad, el cálculo inexacto del precio por hectárea, la escasez de información fidedigna sobre la cantidad de áreas afectadas y familias involucradas, la falta de evaluación de la capacidad de pago de los beneficiarios, la inexactitud de las áreas entregadas a cada familia, el restringido acceso al crédito, al riego, entre otros. Esto ha dificultado los avances en el proceso de titularización de la propiedad, una obra en curso. La realidad hasta el momento es un alto porcentaje de parcelas pequeñas y una constante lucha de las diferentes identidades culturales para materializar sus derechos reconocidos sobre la tierra.

En el país existen alrededor de 200.000 familias que no tienen seguridad en la tenencia de la tierra y que constantemente se ven amenazadas por la expansión de actividades extractivas, petroleras y mineras que dejan fuera la soberanía de los pueblos y comunidades indígenas [42]. Además, la complejidad y el alto costo monetario de los protocolos de regularización dificultan la obtención de títulos de propiedad. De igual manera, la titulación de la tierra en las áreas protegidas es un problema crítico por la falta de procedimientos confiables de información, limitados sistemas de delimitación física y la presencia de mecanismos de registro que ocasionan baja efectividad en su manejo y aplicación. Resolver los problemas de la tenencia de la tierra es un trabajo que los gobiernos de turno deben solucionar, aunque sea un proceso complejo y costoso, pero es clave para la sostenibilidad de los ecosistemas, conservación de la biodiversidad y seguridad de los pueblos y comunidades indígenas.

CONCLUSIONES

Una vez finalizadas las actividades de PROAmazonía, los resultados demuestran que el financiamiento climático no ha logrado reducir la tasa de deforestación que es considerada como una de las más altas de Latinoamérica. La deforestación bruta anual promedio (ha/año) del bienio 2016-2018 fue de 82.5 y en el bienio 2020-2022 fue de 95.5, es decir, se produjo un incremento del -0.66 % al -0.78 %. Esto como consecuencia de factores como las actividades extractivistas de petróleo, minería, madera, agricultura intensiva, ganadería, entre otras.

La participación de los pueblos y comunidades indígenas como los actores que viven y dependen de los bosques ha sido subestimada. Lo ideal sería que estos fondos se destinen a los pueblos y comunidades indígenas que conservan el bosque que, aunque ya está mantenido, no son reconocidos sus derechos. Se debería disminuir el gasto millonario en consultorías que preparan metodologías y en ONG conservacionistas que aplican intrincados planes de REDD+, en iniciativas piloto y proyectos modelo; mientras que, otros se encargan de certificar las aplicaciones de los primeros consultores. Se debería generar una participación activa de los pueblos y comunidades indígenas y construir diálogos con los técnicos y ejecutores, esto requiere de un esfuerzo conjunto para empoderar y fortalecer dichas actividades.



Dentro de los fondos climáticos no se ha destinado un presupuesto para clarificar la propiedad de la tierra. El mecanismo promueve la inversión y gestión de los bosques en áreas saneadas y que están apartadas de los centros urbanos. La falta de seguridad jurídica sobre la tenencia es uno de los principales frenos para la inversión; por consiguiente, clarificar y dar seguridad sobre los derechos de tenencia es el primer paso en el proceso de preparación REDD+.

En la gestión de los proyectos en el país se han dado una serie de actividades adaptativas provocadas por un conjunto de medidas donde la condicionalidad ha obstaculizado el trabajo, lo que ha provocado retrasos y lentitud en el avance de los proyectos.

Por último, la aplicación del financiamiento climático no ha logrado los resultados esperados, ha sido poco eficaz, eficiente y equitativa. La inestabilidad política ha impactado en las áreas de intervención de los proyectos, ha generado acciones lentas por parte de ciertos actores, y tampoco existen directrices claras para ejecutar las acciones requeridas en el marco de sus competencias y líneas de trabajo específicas. Si bien hay ciertos logros, aún existen mucho por hacer, identificar prioridades e intereses locales que se ajusten con los objetivos nacionales.

CONTRIBUCIÓN DE AUTOR

La autora, Alejandra Medina C., inspiró su trabajo en el financiamiento climático como el fundamento que engloba los flujos financieros destinados a contrarrestar el cambio climático y gestionó su tesis: "Evaluación del financiamiento climático de REDD+ Ecuador, periodo 2017-2020" para la obtención del título de Maestría de Cambio Climático, Desarrollo y Sustentabilidad en la Universidad Andina Simón Bolívar.

CONFLICTO DE INTERÉS

La autora declara no tener conflicto de interés en la presente investigación.



REFERENCIAS

- [1] IPCC. (2014). *Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. IPCC.
- [2] Berrueto, J. A. y Díaz, J. (2017). Situación del Convenio Marco de Naciones Unidas sobre el cambio climático. Resumen de las Cumbres de París, COP21 y de Marrakech, COP22. *Revista de Salud Ambiental*, 17(1), 34-39. <https://ojs.diffundit.com/index.php/rsa/article/view/839>
- [3] Molina, M., Carabias, J. y Sarukhán, J. (2017). *El cambio climático: causas, efectos y soluciones*. Fondo de Cultura Económica. https://books.google.com.ec/books/about/El_cambio_clim%C3%A1tico.html?id=YF8yDwAAQBAJ&redir_esc=y
- [4] Romano, A., Scandurra, G., Carfora, A. y Ronghi, M. (2018). *Climate Finance as an Instrument to Promote the Green Growth in Developing Countries*. Springer. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-60711-5>
- [5] IEA. (2016). *Operating agent: Building Research Establishment*. International Energy Agency.
- [6] FAO. (2020). *El Estado de los Bosques del Mundo: los bosques, la biodiversidad y las personas*. FAO. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/1f96827b-5e46-44c0-aa09-49fce55251ea/content/ca8642es.html>
- [7] PNUMA. (2018). La Iniciativa REDD+ y la CMNUCC. *Academia REDD+ Diario de Aprendizaje*, 7(3).
- [8] Watson, C. y Schalteck, L. (2021). *Reseña regional sobre el financiamiento para el clima: América Latina*. Climate Funds Update y Heinrich Bull Stiftung-North America ODI.
- [9] Nepstad, D., Ardila, J. P., Barrionuevo, M. de los Á., Garzón, A., Rojas, J. G., Vargas, R., Busch, J., Bedoya, E. y Bezerra, T. (2019). Evaluación del impacto de políticas públicas destinadas a reducir la deforestación y degradación y acciones destinadas a la gestión sostenible de los bosques en Ecuador. *Carbon Management*, 12(3), 15-233. doi: <https://doi.org/10.1080/17583004.2021.1926331>
- [10] ICLEI. (2020). *Glosario de Financiamiento Climático*. ICLEI. <https://americadosul.iclei.org/wp-content/uploads/sites/78/2021/04/glossario-tap-es-v4.pdf>
- [11] CEPAL. (1989). Glosario de Términos relacionados con la Administración de la Deuda Externa. *Comisión Económica para América Latina y el Caribe*, (49), 1-17. <https://repositorio.cepal.org/entities/publication/a37777f7-3ed6-47e1-99b4-8ee988ffe3c3>
- [12] Stern, N., Peters, S., Bakhshi, V., Bowen, A., Cameron, C., Catovsky, S. y Crane, D. (2006). *Stern Review: The economics of climate change*. Cambridge University Press.
- [13] Angelsen, A., Brockhaus, M., Sunderlin, W. y Verchot, L. (2013). En *Análisis de REDD+: Retos y opciones*. CIFOR. https://www.cifor-icraf.org/publications/pdf_files/Books/BAngelsen1303015.pdf
- [14] Angelsen, A. y Agrawal, A. (2009). Using community forest management to achieve REDD+ goals. *Realising REDD+: national strategy and policy options*, (1), 201-212. https://www.researchgate.net/publication/242601158_Using_community_forest_management_to_achieve_REDD_goals
- [15] Angelsen, A., Kanninen, M., Brockhaus, M., Sunderlin, W. D., Wertz-Kanounnikoff, S. y Sills, E. (2010). REDD+: De lo global a lo nacional. En *La implementación de REDD+: Estrategia nacional y opciones de política*. CIFOR.
- [16] Springate-Baginski, O. y Wollenberg, E. (2010). *REDD, forest governance and rural livelihoods: the emerging agenda*. CIFOR. <https://www.jstor.org/stable/resrep02114.1>
- [17] PNUMA. (2018). Impulsores de la Deforestación y la Degradación. *Academia REDD+ Diario de Aprendizaje*, 6(3).
- [18] PROAmazonía. (2024). *Informe Ejecutivo de Gestión de PROAmazonía*. PROAmazonía. https://info.undp.org/docs/pdc/Documents/ECU/Annual%20Progress%20Project%20Report_2020.pdf
- [19] Muñoz, M. (2021). *Mesa de Trabajo REDD+: 8 años en la preparación e implementación de REDD+ en Ecuador*. PROAmazonía. <https://www.proamazonia.org/mesa-de-trabajo-redd-8-anos-en-la-preparacion-e-implementacion-de-redd-en-ecuador/>
- [20] GCF. (2020). Priming Financial and Land Use Planning Instruments to Reduce Emissions from Deforestation. En J. Jahnsen, F. Salinas y A. Bustillo (Eds.), *Interim Evaluation*. GCF. <https://erc.undp.org/evaluation/documents/download/15665>



- [21] PNUMA. (2018). Bosques y Cambio Climático. *Academia REDD+ Diario de Aprendizaje*, 6(3).
- [22] Ministerio del Ambiente Ecuador. (2019). Primera Contribución Determinada a Nivel Nacional para el Acuerdo de París bajo la Convención Marco de Naciones Unidas Sobre Cambio Climático. Ministerio del Ambiente Ecuador.
- [23] FAO. (2020). Priming Financial and Land Use Planning Instruments to Reduce Emissions from Deforestation. En J. Jahnsen, F. Salinas y A. Bustillo (Eds.), *Interim Evaluation*. GCF. <https://erc.undp.org/evaluation/documents/download/15665>
- [24] GEF. (2019). *Manejo integrado de Paisajes de Uso Múltiple y Alto Valor de Conservación para el desarrollo sostenible de la Región Amazónica Ecuatoriana*. Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo PAÍS: Ecuador. GEF.
- [25] Takaki, F. (2010). *Información Básica para la Construcción de la Tasa de Deforestación*. INEGI. https://www.ccmss.org.mx/wp-content/uploads/2014/10/informacion_basica_para_la_construccion_de_la_tasa_de_deforestacion.pdf
- [26] Angelsen, A. (2020). REDD+: ¿podrá funcionar aún el plan de la ONU para salvar los bosques? CIFOR.
- [27] Sunderlin, W., y Atmadja, S. (2009). Is REDD+ and idea whose time has come, or gone? En Realising REDD: national strategy and policy options. CIFOR.
- [28] Kill, J. (2017). De proyectos REDD+ a REDD+ jurisdiccional: más malas noticias para el clima y las comunidades. *World Rainforest Movement*, (231), 77-98.
- [29] Ministerio del Ambiente Ecuador. (2022). *Deforestación y Regeneración a Nivel Provincial del Periodo 2016–2018 del Ecuador Continental: Mapa Interactivo Ambiental*. SUIA. <http://ide.ambiente.gob.ec:8080/mapainteractivo/>
- [30] Paz, A. J. (2022). La Amazonía ecuatoriana ha perdido más de 623 mil hectáreas en dos décadas. *Mongabay*, (17), 9-32. <https://es.mongabay.com/2022/11/amazonia-ecuatoriana-ha-perdido-mas-de-623-mil-hectareas-en-dos-decadas/>
- [31] Fagua, J. C., Baggio, J. A. y Ramsey, R. D. (2019). Drivers of forest cover changes in the Chocó-Darien Global Ecoregion of South America. *Ecosphere*, 10(3), 5-38. <https://esajournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdfdirect/10.1002/ecs2.2648>
- [32] Ministerio del Ambiente Ecuador. (2020). *Deforestación y Regeneración a Nivel Provincial del Periodo 2016–2018 del Ecuador Continental*. SUIA.
- [33] Paz, A. J. (2019). Nuevo informe revela que el norte del Chocó ecuatoriano ha perdido el 61 % de sus bosques. *Mongabay*, (31), 6-25. <https://es.mongabay.com/2019/07/choco-ecuatoriano-deforestacion-bosques/>
- [34] Ministerio del Ambiente Ecuador. (2023). *Ecuador promueve la conservación de los bosques a través de la Mesa REDD+*. Ministerio del Ambiente Ecuador. <https://www.ambiente.gob.ec/ecuador-promueve-la-conservacion-de-los-bosques-a-traves-de-la-mesa-redd/>
- [35] Ramírez, A. (2016). REDD+ y la gobernanza forestal costarricense. *Estudios en Ecología Política, Desarrollo y Cambio Social*, (61), 2-19.
- [36] Wong, G., Luttrell, C., Loft, L., Yang, A., Pham, T., Naito, D., Assembe-Mvondo, S. and Brockhaus, M. (2019). Narratives in REDD+ benefit sharing: Examining evidence within and beyond the forest sector." *Climate Policy*, 19(8), 1038-51
- [37] FAO. (2016). La tenencia y REDD+: Desarrollo de condiciones favorables de tenencia para REDD+. *Boletín de políticas ONU-REDD*, (6).
- [38] Hayes, T., Murtinho, F. y Wolff. (2017). The impact of payments for environmental services on communal lands: An analysis of the factors driving household land-use behavior in Ecuador. *World Development*, 93(4), 427-46. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0305750X17300050>
- [39] Moreano, M. (2012). Socio Bosque y el Capitalismo Verde. En G. Coffey (Ed.), *Pensando la coyuntura: los cuadernos de La línea de fuego*. Abya-Yala. https://www.researchgate.net/publication/286265228_Socio_bosque_y_el_capitalismo_verde
- [40] León, J. y Rivera, A. (2020). Ilegalidad de la tenencia y desigualdad en la distribución de la tierra en Ecuador como condiciones de vulnerabilidad. *Geopauta*, 4(1), 34-48. https://www.researchgate.net/publication/341364955_llegalidad_de_la_tenencia_y_desigualdad_en_la_distribucion_de_la_tierra_en_Ecuador_como_condiciones_de_vulnerabilidad
- [41] Cabello, J. (2014). Enmascarando la destrucción: REDD+ en la Amazonía peruana. *Movimiento Mundial por los Bosques*, (5), 3-17. <https://www.wrm.org.uy/es/publicaciones/enmascarando-la-destruccion-redd-en-la-amazonia-peruana>
- [42] Ramos, M. (2022). Un esfuerzo colectivo para resolver el problema de tierras en Ecuador. *International Land Coalition*, (7), 3-10.

Maíces con alto contenido de antocianina, biofortificados con zinc, provitamina A y de alta calidad de proteína en Perú

Luis A. Narro León¹, Alexander Chávez Cabrera^{2*}, Peter C. Piña Díaz², Fernando Escobal Valencia², Alicia E. Medina Hoyos², Teodoro P. Narro León², Roberto Alvarado Rodríguez², Krissy A. Vargas Gutiérrez², Fabian C. Velásquez Leveau², Mercedes Escalante Vega¹, Gilberto A. García Pando¹, Pedro Carrillo Zavala¹, Raihil Rengifo Sánchez¹, Elizabeth Risce Belen¹, Demetrio Flores Mendoza³, Willian M. Huamanchay Rodríguez³, Ronal Otiniano Villanueva³

¹ Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú

² Instituto Nacional de Innovación Agraria, Lima, Perú

³ Asociación Patatz, La Libertad, Perú

* Autor para Correspondencia / Corresponding Author, e-mail: achavezcab@yahoo.com

Maize with high anthocyanin, biofortified with zinc, provitamin A, and quality protein in Perú

Abstract

“Hidden hunger” is a serious problem affecting over 2000 million people in developing countries. In Peru, it has increased from 17.7 to 19.6, between 2021 and 2022. This problem is caused by deficiencies in micronutrients and vitamins in humans. Crop biofortification for zinc (Zn), iron (Fe), and provitamin A (ProA) has emerged as an initiative to help solve this problem using conventional breeding (no transgenics). Research in Peru shows the feasibility of promoting biofortified maize with high Zn, high ProA and also high grain yield potential. For purple maize, which contains anthocyanins, a chemical with beneficial effects for humans, studies on varietal adaptation and anthocyanins content are being conducted in Peru. Preliminary results show clear differences among varieties for grain yield potential and high anthocyanin content in the cob, husk, and grain. Purple maize production has increased fourfold in the last twenty years due to increased local consumption and exports. However, its contribution to Gross Domestic Product (GDP) is minimal, less than 1 %. Consequently, this presents a big challenge and an opportunity for research and technology development to increase maize production and link purple maize producers with global consumers. For quality protein maize, available hybrids with high grain yield potential and wide adaptation must be promoted in Peru.

Keywords: Purple maize, malnutrition, biofortification, protein quality

Resumen

Más de 2000 millones de personas en el mundo padecen “hambre oculta” por insuficiencia de minerales y/o vitaminas en la dieta diaria. La situación del hambre en Perú pasó de 17.7 a 19.6 puntos de 2021 a 2022. La biofortificación de cultivos surgió como una iniciativa para ayudar a solucionar este problema mediante la producción de plantas con mayor contenido de zinc (Zn), hierro (Fe) y provitamina A (ProA) en el grano utilizando métodos de mejoramiento convencional (no transgénicos). Los resultados obtenidos en el Perú nos



Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /
Edited by:
María Gabriela Albán

Recibido /
Received:
01/03/2024

Aceptado /
Accepted:
29/05/2024

Publicado en línea /
Published online:
24/06/2024



muestran que existen híbridos de maíz biofortificado, con alto contenido de Zn y ProA, y con muy buen potencial de rendimiento. Para el caso del maíz morado, con alto contenido de antocianinas, un fitoquímico que tiene efectos beneficiosos para la salud de las personas, se está estudiando la adaptación de las variedades en todo el país tanto para el rendimiento del grano como para el contenido de antocianinas. Resultados preliminares indican que hay claras diferencias entre variedades para rendimiento y contenido de antocianina en la coronta, brácteas y grano. La producción de maíz morado se ha cuadruplicado en los últimos 20 años por un mayor consumo interno y por el incremento en las exportaciones. Sin embargo, su contribución al Producto Bruto Interno (PBI) es muy baja: menor al 1 %; lo que es un reto y una oportunidad para desarrollar y transferir tecnología que incremente la producción y vincule al productor de maíz morado con el consumidor. En el caso de maíz de alta calidad de proteína (QPM), se ha liberado en el Perú un híbrido simple (QPM) de color amarillo intenso, con alto potencial de rendimiento y amplia adaptación.

Palabras clave: Maíz morado, desnutrición, biofortificación, calidad de proteína

INTRODUCCIÓN

Más de 2000 millones de personas en el mundo padecen “hambre oculta” debido a la insuficiencia de micronutrientes y/o vitaminas en la dieta diaria y alto consumo de carbohidratos [1,2,3]. Por otro lado, una cantidad similar de personas tiene sobrepeso y obesidad [4]. Ambos problemas son caras de una misma moneda, consecuencia de malos hábitos alimenticios [5,6]. Para encarar este problema, los gobiernos de diversos países han implementado programas de suplementación y fortificación de alimentos que muchas veces no llegan a los pobladores del ámbito rural [2,7]. La biofortificación en base a la gran diversidad de plantas existente es una alternativa complementaria, viable y eficiente, orientada al desarrollo de micronutrientes y vitaminas en cultivos básicos como arroz, camote, maíz, trigo, yuca, entre otros, utilizando principalmente el mejoramiento convencional (sin incluir organismos genéticamente modificados) y el manejo agronómico [2,3,7,8,9,10,11,12,13]. Es decir, la propia planta produce los micronutrientes y vitaminas que la persona necesita y el manejo es similar al de los cultivos no biofortificados.

Existen 149 millones de niños menores de cinco años que sufren retraso en el crecimiento, y alrededor de 50 millones de emaciación (adelgazamiento patológico). Por otro lado, hay sectores de la población donde hay un aumento rápido de tasas de sobrepeso [4,13,14,15]. La FAO [13] informa que entre 691 y 783 millones de personas padecieron hambre en 2022. En 2023, casi 282 millones de personas en 59 países experimentaron altos niveles de hambre aguda, es decir, 24 millones más que en 2022 [16]. La situación del hambre en Perú se ha incrementado de 17.7 puntos en 2021 a 19.6 puntos en 2022, según los últimos resultados del Índice Global del Hambre (IGH) 2023. Esta es la posición más negativa en los últimos 10 años [17].

En Perú, 41.6 % de la población consume alimentos deficientes en Zn, lo que motiva retrasos en el crecimiento, susceptibilidad a enfermedades virales, diarrea y neumonía; principalmente en niños. Los maíces normales (no biofortificados) tienen alrededor de 22 ppm, mientras que los biofortificados más de 34 ppm de Zn.



La deficiencia de vitamina A afecta al 12 % de niños menores de cinco años en el Perú. Esta deficiencia debilita el sistema inmunológico, causa xeroftalmia de la córnea e incluso ceguera completa. El consumo de maíz con ProA se puede dar como consumo directo o como alimento funcional; por ejemplo, gallinas alimentadas con maíz con alto contenido de ProA producen huevos con yemas con mayor contenido de este nutriente. Los maíces biofortificados tienen más de 10 ppm de ProA comparado con 2 ppm de los maíces normales [8,9].

La falta de proteínas durante la niñez puede afectar el desarrollo cognitivo, la reducción del apetito y la enfermedad de *kwashiorkor*. Las proteínas están constituidas por aminoácidos, pero la mayoría de los alimentos no disponen de todos los aminoácidos esenciales en suficiente cantidad. La lisina y el triptófano, por ejemplo, son dos aminoácidos esenciales deficitarios en el grano de maíz normal (no QPM), por lo tanto, las personas que consumen maíz normal en su dieta diaria pueden padecer los síntomas mencionados. Por otro lado, estos dos aminoácidos son importantes para curar la enfermedad de pelagra [18].

Las antocianinas cumplen funciones importantes en las plantas, desde dar protección de la radiación ultravioleta, la atracción de insectos y aves polinizadores, hasta impedir la congelación de las frutas, como las uvas. Estos fitoquímicos, presentes en el maíz morado, tienen efectos benéficos, tales como su capacidad antioxidante o de neutralización de radicales libres y actúan como antimutagénicos [19,20,21]. En el organismo humano, los factores vitamínicos del maíz morado son utilizados como protectores capilares y venosos [22,23] que previenen problemas de aterosclerosis [24]. Además, ayudan a prevenir enfermedades cardiovasculares, ya que estimulan la circulación de la sangre y protegen los vasos sanguíneos de un posible deterioro oxidativo (ayudan a prevenir el envejecimiento prematuro).

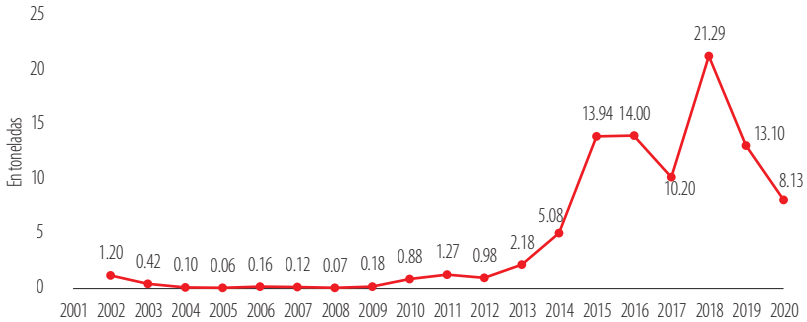
En este entendido, el Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA) y la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), en coordinación con el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT), están realizando la evaluación de maíces biofortificados con alto contenido de Zn, ProA, QPM, y maíces morados con alta calidad y cantidad de antocianinas. El objetivo de este documento es presentar los resultados preliminares obtenidos hasta la fecha en estos cuatro temas.

MAÍZ MORADO CON ALTO CONTENIDO DE ANTOCIANINAS

Entre 2010 y 2020, el principal destino de las exportaciones de maíz morado ha sido Estados Unidos con 50 % del total de exportaciones, seguido por la Unión Europea con alrededor del 20 %. La exportación a Ecuador tuvo un ritmo ascendente pasando de 9.1 % en 2010 a 17.1 % en 2020 (Tabla 1). El precio de exportación de grano de maíz morado en los últimos años ha oscilado entre 2.0 y 2.5 USD/kg para Estados Unidos y España. Para América Latina, como en el caso de Chile, el precio ha bordeado los 0.5 USD/kg.

Además de maíz morado se están exportando antocianinas. Durante el año 2002, se exportó una tonelada de antocianinas y, en el año 2018, la exportación subió a 21.3 toneladas (Figura 1). Los territorios a los cuales se ha exportado antocianina son: Estados Unidos, Corea y la Unión Europea, siendo Estados Unidos el país que lidera la compra de antocianina con el 85.6 % en el año 2020.

Figura 1. Exportación antocianina del año 2002 a 2020.



Fuente: Superintendencia Nacional de Aduanas y de Administración Tributaria -SUNAT (2023).

Tabla 1. Destino y valor de las exportaciones de maíz morado (2010-2020).

	2010		2015		2020	
	mil USD	%	mil USD	%	mil USD	%
Mundo	591	100	1079	100	1542	100
Estados Unidos	354	59,9	683	63,3	656	42,5
Unión Europea	123	20,8	151	14,0	486	31,5
Ecuador	54	9,1	161	14,9	264	17,1
Chile	3	0,5	32	3,0	68	4,4
Japón	12	2,0	19	1,8	24	1,6
Canadá	3	0,5	15	1,4	22	1,4
Otros países	42	7,1	18	1,7	22	1,4

Fuente: Superintendencia Nacional de Aduanas y de Administración Tributaria - SUNAT (2023).

Grobman indica que la raza Kculli ha dado origen a los maíces morados con alta concentración de antocianinas, que proceden de las alturas de la sierra central peruana [25]. La raza Kculli es una de las más de 50 razas de maíz descritas en el Perú [26,27,28]. Kculli en quechua significa negro. Mangelsdorf afirma que, en Perú, Bolivia, Ecuador, Chile, Argentina y Colombia existen razas con pericarpio y aleurona de colores que pudieron haber sido derivadas de la raza Kculli [25].

La presencia de antocianinas en el maíz morado es la principal característica de este tipo de maíz. Las antocianinas del maíz morado son pigmentos naturales hidrosolubles del grupo de los flavonoides y están presentes en las vacuolas de células vegetales que otorgan el color rojo, púrpura o azul a las hojas, flores y frutos de los arándanos, cerezas, frambuesas, repollo morado, berenjena y maíz [29,30].

Las antocianinas del maíz, que aportan múltiples beneficios para la salud humana, producen un color morado oscuro en las tusas o corontas, brácteas o pancas, y en los



granos, lo que resulta por la acción de los alelos dominantes A, B y Pr. El color de la planta está dado por el gen Pr [28,31]. La interrelación entre estos genes está influenciada por la interacción con factores ambientales como la luz solar y los diferentes estreses abióticos donde se desarrolle el cultivo.

La expresión de las antocianinas en el maíz depende del genotipo, es decir la raza, variedad o híbrido de maíz. Asimismo, depende del órgano de la planta donde se expresa y de las condiciones ambientales donde la planta crece. El contenido de antocianinas en el maíz morado es alto, equivalente a 1642 mg/100g de producto fresco entero; otros alimentos con cantidades expresadas en las mismas unidades son el arándano *Vaccinium sp* (558), la frambuesa negra *Rubus occidentalis* (589), la berenjena *Solanum melongena* (750), las uvas rojas y negras *Vitis sp* (888), y *Aronia melanocarpa* (1480) [32].

La producción de maíz morado en el Perú se ha quintuplicado en los últimos 20 años pasando de 4.9 mil toneladas en 2003 a 24.6 mil toneladas en 2020. Este aumento se debe principalmente al incremento de la superficie sembrada que se triplicó pasando de 1.5 mil ha a 4.4 mil ha para el mismo periodo. Respecto al rendimiento de grano, hasta 2010 fue menor a 5.0 t/ha, y a la fecha se mantiene en alrededor de 5.6 t/ha (Tabla 2).

Tabla 2. Producción de maíz morado en el Perú desde 2003 hasta 2020.

Año	Superficie (mil ha)	Producción (mil toneladas)	Rendimiento (t/ha)
2003	1.5	4.9	3.3
2004	1.5	5.0	3.3
2005	1.8	7.7	4.3
2006	1.9	8.0	4.2
2007	2.2	10.5	4.8
2008	2.9	13.6	4.7
2009	3.1	15.1	4.9
2010	3.4	16.9	5.0
2011	3.3	17.8	5.4
2012	3.7	20.0	5.4
2013	3.5	20.1	5.7
2014	3.2	18.0	5.6
2015	3.8	21.2	5.6
2016	3.9	21.5	5.5
2017	4.4	23.5	5.3
2018	4.2	23.2	5.5
2019	4.4	23.1	5.3
2020	4.4	24.6	5.6

Fuente: Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (MIDAGRI), Sistema Integrado de Estadística Agraria (SIEA).



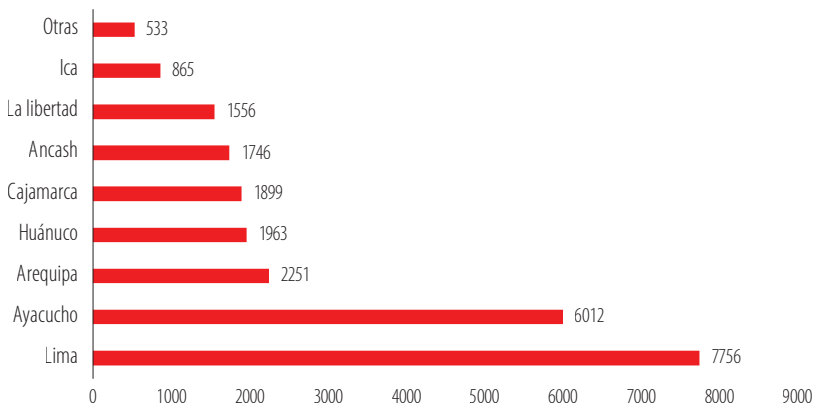
La mayor producción de maíz morado en el Perú se da en las regiones costa y sierra. Para el año 2020 (Figura 2) y para el año 2021 (Tabla 3) las regiones de Lima, Ayacucho, Cajamarca, Arequipa y Ancash fueron las de mayor producción, similar a los años precedentes. La producción el año 2021 alcanzó el 85 % del total en estas cinco regiones. La región de Lima contribuye con el 40 %, y las otras cuatro regiones contribuyen con alrededor de 10 % cada una.

Tabla 3. Producción de maíz morado por región en el Perú (2021).

Región	Superficie		Rendimiento	Producción	
	ha	%	(t/ha)	t	%
Nacional	3875	100	5.1	20091	100
Lima	1216	31	6.6	8008	40
Ayacucho	763	20	3.4	2812	13
Cajamarca	613	16	3.8	2347	12
Arequipa	377	10	5.3	1999	10
Ancash	376	10	5.2	1948	10
Otras	530	13		2377	15

Fuente: Censo Anual de Producción Agrícola. Ministerio de Agricultura y Riego - Dirección General de Estadística, Seguimiento y Evaluación de Políticas - Dirección de Estadística e Información Agraria. <https://www.gob.pe/institucion/midagri/informes-publicaciones/2730325-compendio-anual-de-produccion-agricola>

Figura 2. Regiones productoras de maíz morado en el Perú (t) el año 2020.



Fuente: Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego. Dirección General de Seguimiento y Evaluación de Políticas – DGESEP

El aumento en el consumo de maíz morado ha sido el factor determinante para el incremento de la demanda en el Perú. Actualmente se consume chicha morada en todo el país y se ha diversificado el consumo de otros productos alimenticios en muchas



regiones. Diversas actividades, como ferias en varios puntos del país, están determinando una mayor utilización en la agroindustria y, por lo tanto, el incremento de la demanda de maíz morado. No obstante, el aporte del maíz al PBI de la producción agrícola para el año 2020 es baja: equivalente al 5.9 % entre todos los tipos de maíz (duro, amiláceo, choclo, morado). De la misma manera, el maíz morado contribuye solo con el 0.09 % [32]. Este hecho es un reto y una oportunidad para incrementar la producción del maíz morado en beneficio de la humanidad aprovechando las propiedades de las antocianinas presentes en la coronta o tusa, la panca o brácteas y el grano de la planta. De esta forma se pueden utilizar las ventajas comparativas del cultivo como alimento funcional y como insumo para la industria farmacéutica, entre otras.

En consecuencia, se deben incrementar los trabajos de maíz morado en el Perú, tanto para aumentar el consumo interno como para la exportación, a través de la cual el mundo puede beneficiarse de sus propiedades funcionales, antioxidantes, antiinflamatorias, anticancerígenas, entre otras.

Para mejorar la eficiencia en la utilización de germoplasma de la raza Kculli, se requiere desarrollar cultivares (variedades e híbridos) y conocer su comportamiento en diferentes ambientes donde se evalúe tanto la producción de grano, como el contenido de antocianinas en el grano, la tusa y la coronta. En el Perú se han generado variedades por la UNALM y por el INIA principalmente. El MIDAGRI [32] describe hasta 10 variedades de maíz morado: seis variedades locales denominadas como las “más conocidas” y cuatro variedades mejoradas.

A continuación, se resumen las características de las seis variedades “más conocidas”:

- **Cusco Morado:** variedad relacionada a la raza Cusco Gigante. Se cultiva en zonas de altitud intermedia en los departamentos de Cusco y Apurímac.
- **Morado Canteño:** derivada de la raza Cusco, pero más precoz. Se cultiva principalmente en las partes altas del valle Chillón en Lima, hasta 2500 m s.n.m. Es la variedad de mayor consumo en Lima.
- **Morado de Caraz:** derivada de las razas Ancashino y Alazán. De precocidad intermedia, se cultiva en la sierra y costa de la región de Ancash. Muestra buen potencial de rendimiento y las corontas son más pigmentadas que las de otras variedades.
- **Arequipeño:** forma de la mazorca similar a la raza Cusco. Procede de la sierra de Arequipa y es precoz. El color de la tusa no es tan intenso como en otras variedades.
- **Negro de Junín:** variedad precoz de granos negros, grandes, dispuestos irregularmente en una mazorca corta y redondeada similar a la raza San Jerónimo.
- **Huancavelicano:** se encuentra en la sierra centro y sur, hasta Arequipa. Se siembra a mayores altitudes que las otras variedades.



Las 4 variedades mejoradas son:

- **PMV-581:** variedad desarrollada por la UNALM, derivada de la variedad morado de Caraz, adaptada a la costa y sierra baja, con resistencia a roya y *Cercospora* sp. Su periodo vegetativo es intermedio, con mazorcas medianas, alargadas, con alto contenido de antocianina y potencial de rendimiento de 6.0 t/ha [27].
- **PMV-582:** variedad mejorada por la UNALM, adaptada para las condiciones de la sierra alta.
- **INIA-601:** desarrollada por el INIA, Estación Experimental Baños del Inca, Cajamarca. Formada con 108 progenies de la variedad Morado de Caraz y 148 progenies de la variedad Negro de Parubamba [33]. Fue liberada el año 2000. Tiene alto contenido de antocianina en coronta y brácteas [24].
- **INIA-615 Negro Canaán:** desarrollada por el INIA, Estación Experimental Canaán, Ayacucho. Está formada por 36 colecciones de la raza Kculli y fue liberada el año 2007.

Respecto a investigaciones recientes, se ha presentado un estudio de evaluación de seis variedades comerciales de maíz morado en 18 ambientes de la región de Cajamarca [24]. Las variedades fueron INIA-601, Sintético Maíz Morado, INIA-615, UNC-47, PMV-581 y Canteño. Los ambientes de evaluación estuvieron ubicados entre 2388 y 3175 m s.n.m. El manejo de los ensayos se hizo con una fertilización de acuerdo con el ambiente, aunque sin mucha variación entre ellos. La dosis de nitrógeno osciló entre 100 y 120 unidades, la de fósforo entre 40 y 60 unidades de P_2O_5 , y la de potasio de 40 unidades de K_2O . La densidad de siembra fue de 50000 plantas/ha. El control de insectos se realizó de acuerdo con el requerimiento del cultivo, mas no se hizo control para enfermedades.

Los resultados mostraron que hay interacción genotipo-ambiente altamente significativa ($P < 0.001$), lo que indica que el comportamiento de cada variedad fue diferente de acuerdo con el ambiente de evaluación; por esta razón se calculó el valor de estabilidad promedio (ASV = Average Stability Value). Los valores de ASV fueron de 0.23 para INIA-615, 0.47 para UNC-47, 0.68 para INIA-601, 0.71 para el Sintético Maíz Morado, 1.03 para PMV-581 y 1.54 para Canteño.

Las variedades más estables son aquellas que tienen menores valores de ASV, los mismos que pueden ser explicados porque las variedades UNC-47, INIA-601 y Sintético Maíz Morado tienen como fuente de germoplasma tipos de maíz morado adaptados a las condiciones de Cajamarca, donde se realizaron los experimentos. Los mayores valores de ASV corresponden a PMV-581 y Canteño, variedades mejor adaptadas a la costa y la sierra baja; especial explicación se requiere para la variedad INIA-615. El rendimiento promedio de grano al 14 % de humedad oscila entre 2.77 t/ha (INIA 601) y 1.90 t/ha (Canteño) (Tabla 4).

Tabla 4. Rendimiento de grano, ASV (Average Stability Value) y contenido de antocianinas de seis variedades de maíz morado evaluadas en la región de Cajamarca.

Variedad	Rendimiento de grano (t/ha)	ASV	Antocianinas	
			Coronta	Brácteas
			----- (%) -----	
INIA 601	2.77 a	0.68	6.12 a	3.18 a
Sintético MM	2.50 ab	0.71	5.63 a	1.76 b
INIA 615	2.40 b	0.23	5.44 a	1.18 b
UNC 47	2.31 b	0.47	5.7 a	1.9 b
PMV 581	2.15 c	1.02	4.14 b	0.8 c
Canteño	1.90 d	1.54	4.66 b	0.63 c
Promedio	2.34	0.78	5.28	1.58

Promedios seguidos de la misma letra en la vertical no son diferentes estadísticamente por la prueba de Tuckey
Fuente: [24]

En el mismo estudio [24] se reportó que el porcentaje de antocianinas en la coronta (5.28 %) fue tres veces mayor que en las brácteas (1.58 %). Los valores de antocianinas en la coronta fueron mayores para INIA-601 (6.12 %), Sintético MM (5.63 %), INIA-615 (5.44 %) y UNC-47 (5.7 %), sin diferencia significativa entre ellas. Por otra parte, las variedades PMV-581 y Canteño mostraron menores valores: 4.14 % y 4.66 %, respectivamente. Con relación al contenido de antocianinas en las brácteas, se observaron 3 grupos: la variedad INIA-601 tuvo el mayor valor equivalente a 3.18 %, el segundo grupo lo integró Sintético MM con 1.76 %, INIA-615 con 1.18 % y UNC-47 con 1.9 %, sin diferencia significativa entre ellas; el tercer grupo lo formaron las variedades PMV-581 y Canteño con valores de 0.8 % y 0.63 %, respectivamente (Tabla 4).

Con base en estos resultados se está estudiando ampliamente la adaptación de las variedades, incluyendo 30 localidades en diferentes regiones del país. Se presentan los resultados de dos localidades, una en la costa (Mala, Lima) ubicada a 80 m s.n.m. y una en la sierra (Baños del Inca, Cajamarca) a 2666 m s.n.m. El ensayo en Cajamarca fue sembrado en la época normal de siembra (diciembre de 2022 a julio de 2023), y solo se requirió un riego al momento de la floración por ausencia de lluvias en esta época. Mientras que, en Lima, el ensayo fue conducido entre mayo y septiembre de 2023 con aplicación de riego semanal, por goteo. El manejo del cultivo, la fertilización, la densidad de siembra, y el control de malezas y plagas fueron estándar en la conducción de estos ensayos en ambas localidades.

Los datos de rendimiento de grano son expresados al 14 % de humedad. En la localidad de Cajamarca el rendimiento promedio fue de 6.78 t/ha sin diferencia significativa entre las variedades. En cambio, en Lima el rendimiento promedio fue de 5.46 t/ha y se observó diferencia significativa entre las variedades; INIA-615 tuvo el mayor rendimiento (6.70 t/ha) superior al rendimiento de la variedad testigo INIA-601, que rindió 3.70 t/ha (Tabla 5). Es importante notar que el rendimiento de la variedad INIA-615 fue similar al rendimiento de las variedades Canteño (6.64 t/ha) y PMV-581 (6.40 t/ha); estas últimas



recomendadas para la costa y la sierra baja. Por lo tanto, es un resultado esperado, ya que las variedades INIA-601 y Sintético MM, desarrolladas para condiciones de sierra media-alta, mostraron menor rendimiento (3.8 t/ha). Con la determinación de antocianinas para cada variedad en cada localidad, trabajo en ejecución, se tendrá una idea más clara de la adaptación de las variedades a las diferentes condiciones ambientales del país y su variación en el contenido de antocianinas.

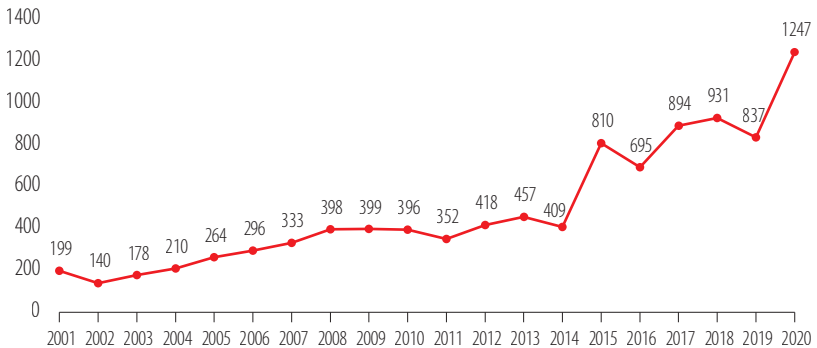
Tabla 5. Rendimiento (t/ha) de cinco variedades de maíz morado en dos localidades de Perú (2023).

Variedades	Localidades	
	Baños del Inca Cajamarca	Mala Lima
Canteño	5.95 a	6.64 a
INIA 601 (T)	7.21 a	3.70 b
INIA 615	7.93 a	6.70 a
PMV 581	6.42 a	6.40 a
Sintético MM	6.39 a	3.86 b
Promedio	6.78	5.46
LSD (0.05)	2.67	1.40
CV	11.6	26.1

Promedios seguidos de la misma letra en la vertical no son diferentes estadísticamente por la prueba de Tuckey.

La información que se ha generado, permitirá incrementar la producción por región geográfica para promover el mayor consumo interno, así como la exportación. Respecto al comercio internacional, la exportación del maíz morado ha tenido un crecimiento significativo habiéndose triplicado entre 2010 y 2020, pasando de 396 a 1247 toneladas para este periodo; en forma similar el valor de las exportaciones se incrementó de 591 mil USD a 1.542 millones de USD para 2010 y 2020, respectivamente (Tabla 6 y Figura 3).

Figura 3. Exportación de maíz morado (t) desde 2001 hasta 2020.



Fuente: Superintendencia Nacional de Aduanas y de Administración Tributaria -SUNAT (2023).

Tabla 6. Volumen y valor de la exportación de maíz morado y derivados (2010-2020).

Año	Volumen (t)	Valor (mil USD)
2010	396	591
2015	810	1079
2020	1242	1542

Fuente: Superintendencia Nacional de Aduanas y de Administración Tributaria - SUNAT (2023).

MAÍZ BIOFORTIFICADO CON ZINC

Existe alto riesgo de deficiencia de Zn en la alimentación de varios países de Latinoamérica. En el Perú, el 41.6 % de la población consume una cantidad insuficiente de Zn. El 18.3 % de los niños menores de cinco años padece de raquitismo; esta prevalencia asciende al 32 % en las zonas rurales y al 37 % en la población más pobre. La deficiencia de Zn conlleva retrasos del crecimiento, incremento de la morbilidad en enfermedades infecciosas, especialmente virales, diarrea y neumonía, principalmente en los dos primeros años de vida. El Zn es un cofactor esencial para muchas enzimas y juega un rol importante en la síntesis de DNA y RNA y en la expresión de genes. La deficiencia de Zn controla la absorción de hierro en los intestinos, por lo tanto, estos micronutrientes deben ser reconocidos en la salud pública global como mencionan Nriagu (2007), Chang et al. (2010) y Graham et al. (2012), citados por [34].

Con la finalidad de aprovechar las bondades de los maíces con alto contenido de Zn y de provitamina A en el Perú, se están evaluando variedades e híbridos procedentes del CIMMYT. Los maíces normales (no biofortificados), tienen un contenido de Zn de alrededor de 22 ppm, mientras que los biofortificados tienen más de 34 ppm.

Variedades de maíz biofortificado con Zn han sido evaluadas en tres localidades: dos en la sierra y una en la costa. En la sierra, en la localidad de Chagualito, distrito de Cochorco, provincia de Sánchez Carrión, departamento de La Libertad, ubicada a 1200 m s.n.m., se sembraron los ensayos en los años 2021 y 2022. El experimento en la costa fue sembrado en Lima, en la UNALM, en el año 2021. En ambas localidades, los experimentos fueron conducidos de acuerdo con las recomendaciones para cada localidad, utilizando como testigo la variedad de polinización abierta Marginal 28 Tropical (M28T).

No hubo diferencia significativa para rendimiento de grano entre las seis variedades en ninguna de las tres localidades (Tabla 7). El rendimiento de grano en la localidad de Lima fue tres veces superior al de las localidades de la sierra. Esto puede darse debido al tipo de germoplasma, ya que tanto las variedades biofortificadas con Zn como el testigo M28T se adaptan mejor al trópico bajo como a la costa; otro aspecto puede ser la disponibilidad de agua para la planta, ya que en Lima se riega cada vez que el cultivo lo necesita, y en la sierra el cultivo depende de la ocurrencia de lluvias. Esto ha determinado que el rendimiento promedio en Lima sea de 10.5 t/ha y en Chagualito



menor a 4.0 t/ha. Tanto en Lima como en Chagalito las variedades biofortificadas con Zn tendieron a rendir más que las no biofortificadas, ventaja nutricional que debería ser aprovechada por los consumidores en todo el mundo.

Tabla 7. Rendimiento de grano de seis variedades de maíz biofortificado con zinc.

N°	Variedad	Chagalito 1		Lima - UNALM		Chagalito 2	
		t/ha	Ranking	t/ha	Ranking	t/ha	Ranking
1	S13LTWQHZNHGAB01	3.6	4	10.3	5	2.8	6
2	S13LTWQHZNHGAB02	3.6	4	10.8	4	4.6	1
3	S13LTWQHZNHGAB03	4.9	1	11.4	1	3.2	4
4	CCSZN1	4.5	2	8.7	6	3.8	2
5	CCSZN2	3.7	3	11.2	2	2.9	5
6	Marginal 28 Tropical (M28T)	2.9	5	10.8	3	3.7	3
	Promedio	3.9		10.5		3.5	
	LSD (0.05)	2.9		2.2		1.6	
	CV	18.5		9.5		18.8	

Para que, en una comparación planeada de cualquier característica exista significancia, el valor de la comparación entre la mejor variedad y el testigo debe ser mayor al valor de LSD [47]. En este caso, los valores para Chagalito 1 son 2.0 t/ha (resultado de 4.9 - 2.9) y 2.9 t/ha, respectivamente; por lo tanto, no hay diferencia significativa. Siguiendo el mismo principio, en Lima-UNALM, el valor de 0.6 t/ha (resultado de 11.4 - 10.8) es menor que LSD = 2.2 t/ha; por lo tanto, tampoco hay diferencia significativa. Lo mismo sucede en la localidad Chagalito 2, en la que los valores son 0.9 (resultado de 4.6 - 3.7) y 1.6, respectivamente.

En otro estudio se evaluaron 20 híbridos, de los cuales 17 son biofortificados y tres son testigos no biofortificados. Los experimentos fueron sembrados en los años 2021 y 2023 en dos localidades: Chagalito y la Estación Experimental Agraria (EEA) Donoso en Huaral, Lima. La localidad Chagalito está ubicada a 1200 m s.n.m. y la EEA Donoso a 126 m s.n.m. No hubo diferencia significativa para rendimiento de grano entre los 20 híbridos en ninguna de las dos localidades (Tabla 8).



Tabla 8. Rendimiento de 20 híbridos de maíz biofortificado con zinc (2021 y 2023).

N°	Híbrido	EEA Donoso - Lima				Chagalito - La Libertad			
		Rendimiento		Pudrición de mazorca		Rendimiento		Pudrición de mazorca	
		(t/ha)	Ranking	(%)	Ranking	(t/ha)	Ranking	(%)	Ranking
1	CLTHWZN17007	14.3	4	2.6	7	5.5	17	5.9	8
2	CLTHWZN17010	12.6	17	3.1	4	6.5	3	4.4	13
3	CLTHWZN17022	13.6	8	1.7	15	6.5	4	4.1	16
4	CLTHWZN18006	12.5	18	2.7	6	6.3	9	4.8	11
5	CLTHWZN18081	14.5	3	1.8	13	6.1	12	4.0	18
6	CLTHWZN17103	13.7	6	2.0	11	6.3	10	4.1	17
7	CLTHWZN17105	12.4	19	1.0	19	6.5	5	6.1	4
8	CLTHWZN18201	11.5	20	3.0	5	5.6	16	2.4	20
9	CLTHWZN18203	14.9	1	0.9	20	6.5	6	6.5	3
10	CLTHWZN18204	14.3	5	1.2	17	5.8	13	6.0	6
11	CLTHWZN18209	12.7	16	4.5	2	5.7	14	5.9	9
12	CLTHWZN18211	13.0	13	1.9	12	6.5	7	4.2	15
13	CLTHWZN18212	13.2	10	4.8	1	5.7	15	5.5	10
14	CLTHWZN16051	13.1	11	3.4	3	5.4	18	4.3	14
15	CLTHWZN15010	13.7	7	2.4	9	5.1	19	3.1	19
16	CLTHWZN17120	12.8	15	1.8	14	6.4	8	4.6	12
17	CLTHWZN17117	12.9	14	2.5	8	6.3	11	6.0	7
18	CLTHW14003	14.8	2	1.1	18	5.0	20	6.1	5
19	INIA 619	13.1	12	2.4	10	6.9	1	6.8	2
20	M28T	13.3	9	1.5	16	6.8	2	9.4	1
	Promedio	13.4		2.3		6.1		5.2	
	LSD (0.05)	3.26		2.3		1.17		3.3	
	CV	6.64		46		9.18		29	
	Mejor híbrido	14.9		0.9		6.5		2.4	
	Diferencia	1.6		0.6		0.4		4.4	
	Significación	ns		ns		ns		*	

No se encontró diferencia significativa para rendimiento de grano entre los 20 híbridos en ninguna de las dos localidades, porque los valores de la comparación entre el mejor híbrido y el mejor testigo, 1.6 y 0.4, fueron inferiores a los valores de LSD, 3.26 y 1.17, respectivamente. Con relación a pudrición de mazorca hubo diferencia significativa entre híbridos en Chagalito más no en Lima. En Chagalito, el testigo con menor pudrición fue el híbrido 19 (6.8 %), el híbrido experimental con menor pudrición fue el híbrido 8 (2.4 %), LSD = 3.3 %.



El rendimiento de grano (14 % de humedad) en la localidad de Lima fue dos veces superior al de Chagualito, y la pudrición de mazorca fue el doble en Chagualito que en Lima. Con relación al rendimiento de grano, el promedio en Lima fue de 13.4 t/ha y el rango de variación entre 11.5 y 14.9 t/ha; mientras que en Chagualito, el rendimiento promedio fue de 6.1 t/ha con un rango de variación entre 5.0 y 6.9 t/ha. Las razones por las cuales se obtuvo mayor rendimiento en la costa que en la sierra son las mismas indicadas para el caso de la evaluación de variedades.

Con relación a la pudrición de la mazorca, no hubo diferencia significativa entre híbridos en Lima, pero sí en Chagualito. En Lima la pudrición de mazorca para el mejor híbrido fue del 0.9 % (híbrido 9), comparado con el 1.5 % del mejor testigo (M28T); el valor de LSD fue 2.3. En Chagualito, el híbrido con menor pudrición fue el número 8 con el 2.4 % comparado con el 6.8 % para el mejor testigo (INIA-619); el valor de LSD fue de 3.3. (Tabla 8). *Fusarium* sp. fue la principal causa de la pudrición de mazorca. Como en el caso de la evaluación de variedades, los híbridos biofortificados tienen similar rendimiento que los híbridos testigo, lo que significa una ventaja en favor de los maíces biofortificados por su mayor contenido de Zn, y mejora el valor nutricional de estos tipos de maíz.

Otro ensayo fue sembrado en Lima – UNALM, en el año 2022. En este ensayo se evaluaron 20 híbridos diferentes a los indicados en el anterior estudio: 17 híbridos biofortificados y 3 híbridos testigo (híbridos 17, 18 y 19). En la Tabla 9 se presenta el rendimiento de grano (t/ha) al 14 % de humedad y el contenido de Zn en partes por millón (ppm) de los híbridos. No se observó diferencia significativa para rendimiento de grano entre los 20 híbridos. El rendimiento promedio fue de 11.6 t/ha. Asimismo, se observó la tendencia de mayor rendimiento para algunos híbridos biofortificados como el híbrido 10 con 13.9 t/ha. Con relación al contenido de Zn en el grano, se considera que un maíz no biofortificado debe tener alrededor de 22 ppm, y que un maíz biofortificado debe tener más de 33 ppm. Según este criterio, 10 híbridos tienen un contenido de Zn superior al 33 %. El híbrido 14 (CLTHW16138) posee un contenido de Zn muy alto (44.5 ppm) y también un alto rendimiento (13.7 t/ha); por lo tanto, es un candidato para ser liberado si se ratifica este comportamiento en posteriores evaluaciones. Los híbridos con cantidades de Zn mayores a 37 ppm pueden servir como fuentes para la obtención de germoplasma con esta característica. El híbrido 19 (testigo) tiene 37.5 ppm de Zn, y es un híbrido biofortificado liberado en Colombia por su alto contenido de Zn y su alto potencial de rendimiento. Los resultados obtenidos en el estudio ratifican las características de este híbrido.



Tabla 9. Rendimiento de 20 híbridos de maíz biofortificado con zinc (2022).

N°	Híbrido	Rendimiento		Contenido de zinc	
		t/ha	Ranking	ppm	Ranking
1	CLTHWZN17113	8.7	20	28.0	20
2	CLTHWZN18212	9.0	19	31.5	12
3	CLTHWZN19502	11.1	13	39.5	3
4	CLTHWZN19514	12.2	8	29.5	16
5	CLTHWZN19518	10.8	17	31.5	13
6	CLTHWZN19520	10.9	16	29.5	17
7	CLTHWZN19523	12.8	4	35.0	9
8	CLTHWZN20524	13.1	3	29.5	18
9	CLTHWZN20525	12.2	7	34.0	10
10	CLTHWZN17009	13.9	1	29.5	19
11	CLTHWZN18018	9.7	18	37.5	5
12	CLTHWZN20529	11.5	12	36.5	7
13	CLTHWZN20530	11.6	11	38.0	4
14	CLTHW16138	13.7	2	44.5	1
15	CLTHWZN20533	11.0	15	41.5	2
16	CLTHWZN17103	12.3	6	35.5	8
17	CLTHWZN18209	12.6	5	31.5	14
18	CLTHW14003	11.8	9	33.3	11
19	SGBIO H2	11.6	10	37.5	6
20	PM 213	11.0	14	31.5	15
	Promedio	11.6			
	LSD (0.05)	2.9			
	CV	119			
	Mejor híbrido	13.9			
	Diferencia	2.9			
	Significación	ns			

Para rendimiento de grano, la diferencia entre el híbrido de mayor rendimiento (13.9 t/ha) y el del mejor testigo (11.6 t/ha) fue de 2.3 t/ha; el valor de LSD es 2.9 t/ha; por lo tanto no hay diferencia significativa, criterio utilizado en la interpretación de resultados en esta publicación [47].



MAÍZ BIOFORTIFICADO CON PROVITAMINA A (ProA)

La deficiencia de vitamina A afecta al 12 % de niños menores de cinco años en Perú. Su carencia debilita el sistema inmunológico, causa xeroftalmia de la córnea, e incluso ceguera completa. Estudios de biodisponibilidad han demostrado que la ProA se convierte eficientemente en retinol, la forma de vitamina A utilizada por el cuerpo humano y, por lo tanto, este beneficio puede ser aprovechado con el consumo de alimentos con mayor contenido de provitamina A [35]. Los maíces biofortificados tienen más de 10 ppm de ProA comparado con 2 ppm de los normales [36]. En cambio, el maíz blanco no contiene ProA. La investigación y promoción del cultivo de maíz amarillo biofortificado con ProA puede ser una alternativa viable en el Perú y en el mundo, ya que las gallinas ponedoras que consumen este tipo de maíz producen huevos con yemas con mayor contenido de ProA que beneficiaría a la población rural y urbana.

Con la finalidad de implementar esta idea se empezó a evaluar este tipo de maíz en ambientes de la sierra y la costa del Perú. El año 2020 fueron instalados dos ensayos de evaluación de variedades en dos localidades: EEA Vista Florida del INIA en la región Lambayeque y Chagualito en la región La Libertad. En ambas localidades se evaluaron 10 cultivares, de las cuales 3 variedades son biofortificadas con ProA, 5 biofortificadas con Zn y 2 híbridos testigo no biofortificados: uno de color blanco (T1) y otro de color amarillo (T2).

En Vista Florida, el rendimiento promedio fue de 5.9 t/ha y no se observó diferencia significativa entre los cultivares evaluados. Sin embargo, se observa la tendencia de mayor rendimiento de los híbridos testigo con alrededor de 7.5 t/ha, mientras que el rendimiento de las variedades biofortificadas con ProA (cultivares 6, 7 y 8) rindieron entre 3.2 y 6.5 t/ha (Tabla 10). En Chagualito, el rendimiento promedio fue de 6.3 t/ha y tampoco se observó diferencia significativa entre los cultivares evaluados. Se detectó también la tendencia de mayor rendimiento de los híbridos testigo siendo el más alto del T1 (7.8 t/ha). Por otro lado, el rendimiento de las variedades biofortificadas con ProA osciló entre 3.7 y 6.0 t/ha. En la Tabla 10 se presenta el porcentaje de pudrición de mazorca que solo fue evaluado en Chagualito (sin encontrar diferencias significativas). En Vista Florida los daños por esta causa fueron muy pequeños. En Chagualito el mayor valor de pudrición de mazorca fue de 4.8 %, correspondiente al cultivar 6, y el menor de 0.3 % correspondiente a T2. Tanto las variedades biofortificadas con ProA como los demás cultivares evaluados mostraron similares características morfológicas y fisiológicas como altura de planta y mazorca, días a la floración masculina y femenina, etc.

Tabla 10. Evaluación de variedades de maíz biofortificado con ProA (2020).

N°	Cultivar	EEA Vista Florida, Lambayeque		Chagualito, La Libertad			
		Rendimiento		Rendimiento		Pudrición de mazorca	
		(t/ha)	Ranking	(t/ha)	Ranking	(%)	Ranking
1	S13LTWQHZNHGAB02	5.7	6	5.1	9	3.5	4
2	CCSZN1	4.8	9	6.2	6	3.5	5
3	HEZN002	5.3	7	7.4	3	2.2	6
4	HEZN006	6.2	5	7.9	1	1.2	8
5	HEZN007	7.1	3	6.7	5	1.5	7
6	CCSPROA1	5.3	8	5.6	8	4.8	1
7	CCSPROA2	6.5	4	6.0	7	4.2	2
8	HIGPROASYN3-BULK#1-B	3.2	10	3.7	10	3.9	3
9	Híbrido blanco (T1)	7.8	1	7.8	2	1.2	9
10	Híbrido amarillo (T2)	7.3	2	6.9	4	0.3	10
	Promedio	5.9		6.3		2.6	
	LSD (0.05)	2.7		1.0		3.8	
	CV	22.9		20.3		59	
	Mejor cultivar	7.1		7.9		1.2	
	Diferencia	0.7		0.1		0.9	
	Significación	ns		ns		ns	

Para rendimiento de grano en la EEA Vista Florida, la diferencia entre el híbrido de mayor rendimiento (7.1 t/ha) y el del mejor testigo (7.8 t/ha) fue de -0.7 t/ha; el valor de LSD fue 2.7 t/ha. Para rendimiento de grano en Chagualito, la diferencia entre el híbrido de mayor rendimiento (7.9 t/ha) y el del mejor testigo (7.8 t/ha) fue de 0.1 t/ha; el valor de LSD es 1.0 t/ha; por lo tanto no hay diferencia significativa para rendimiento en las dos localidades. Para pudrición de mazorca en Chagualito la diferencia entre el mejor testigo (0.3 %) y el mejor híbrido (1.2 %), fue de 0.9 %; el valor de LSD fue 3.8 %, por lo tanto tampoco hubo diferencia significativa.

En base a los resultados obtenidos, el año 2023 se sembró un nuevo ensayo con 22 híbridos biofortificados con ProA en la UNALM en Lima, y se incluyó dos híbridos testigo no biofortificados (Tabla 11).

Con relación al rendimiento de grano, es importante destacar el alto potencial de los maíces biofortificados. No existe diferencia entre el rendimiento del mejor híbrido CLHP0003/CLHP0005&CML304 (híbrido 19) con 14.0 t/ha y el mejor híbrido testigo con 11.1 t/ha, que corresponde a un híbrido amarillo comercial ampliamente difundido tanto en el Perú como en otros países. Esto indica que se pueden conseguir beneficios adicionales de los maíces biofortificados por su alto potencial de rendimiento. Al menos 12 híbridos biofortificados tuvieron rendimientos superiores al del mejor testigo (Tabla 11).

Tabla 11. Evaluación de híbridos de maíz biofortificado con ProA sembrado en la UNALM (2023).

N°	Híbrido	Rendimiento		Pudrición de mazorca	
		(t/ha)	Ranking	(%)	Ranking
1	CLHP0003/CLHP0005&(CLHP00294/CI7//CML451)-20-1-2-1-B	11.2	10	4.4	6
2	CLHP0003/CLHP0005&(CLHP00294/CI7//CML451)-28-1-1-1-B	12.2	4	3.1	14
3	CLHP0003/CLHP0005&(CLHP00478/(CAROTENOIDSYN3-FS8-4-6-B/CML324-B//KUI3/B77)-S2-1//CML304)-135-1-2-2-B	11.5	8	1.5	22
4	HPYL1814/CLHP00306&(CLHP0345//CML537/(KUICAROTENOIDSYN-FS17-3-2-B*3/(KU1409/DE3/KU1409)-B-B-18-2-B)-B-4(MAS:L4H1)-1-B*4//CML537)-#-2-1-3-1-B	10.2	20	1.7	21
5	HPYL1814/CLHP00294&(CLHP0345//CLHP0005/(KUICAROTENOIDSYN-FS17-3-2-B*3/(KU1409/DE3/KU1409)-B-B-18-2-B)-B-3(MAS:L4H1)-2-B*4//CLHP0005)-#-166-1-3-1-B	12.2	5	3.1	15
6	HPYL187/CLHP00306&(CLHP0345//CML537/(KUICAROTENOIDSYN-FS17-3-2-B*3/(KU1409/DE3/KU1409)-B-B-18-2-B)-B-4(MAS:L4H1)-1-B*4//CML537)-#-34-1-1-1-B	10.9	14	2.3	18
7	CLHP0014/CLHP0003&(CLHP00306//CML451/(KUICAROTENOIDSYN-FS11-1-1-B*3/(KU1409/DE3/KU1409)-B-B-18-2-B)-B-2(MAS:L4H1)-3-B*4//CML451)-#-18-1-2-2-B	10.8	15	3.2	13
8	HPYL1814/CLHP00294&(CLHP0303//CML537/(KUICAROTENOIDSYN-FS17-3-2-B*3/(KU1409/DE3/KU1409)-B-B-18-2-B)-B-4(MAS:L4H1)-1-B*4//CML537)-#-24-1-1-1-B	10.7	16	5.9	2
9	HPYL1814/CLHP00294&(CLHP0345//CML537/(KUICAROTENOIDSYN-FS17-3-2-B*3/(KU1409/DE3/KU1409)-B-B-18-2-B)-B-4(MAS:L4H1)-1-B*4//CML537)-#-55-1-1-2-B	10.2	21	3.1	16
10	CLHP0014/CLHP0003&(CLHP00294/CI7//CML451)-59-1-3-1-B	11.6	6	4.9	3
11	HPYL1814/CLHP00294&(CLHP0303//CML537/(KUICAROTENOIDSYN-FS17-3-2-B*3/(KU1409/DE3/KU1409)-B-B-18-2-B)-B-4(MAS:L4H1)-1-B*4//CML537)-#-7-1-1-1-B	10.7	17	4.0	11
12	HPYL187/CLHP00306&(CLHP0345//CML537/(KUICAROTENOIDSYN-FS17-3-2-B*3/(KU1409/DE3/KU1409)-B-B-18-2-B)-B-4(MAS:L4H1)-1-B*4//CML537)-#-59-2-3-1-B	10.5	19	4.8	4
13	HPYL187/CLHP00306&(CLHP0345//CLHP0005/(KUICAROTENOIDSYN-FS17-3-2-B*3/(KU1409/DE3/KU1409)-B-B-18-2-B)-B-3(MAS:L4H1)-2-B*4//CLHP0005)-#-166-1-3-1-B	11.2	11	4.1	7
14	CLHP0003/CLHP0005&HPYL1924	7.7	23	4.1	8
15	CLHP0003/CLHP0005&HPYL1834	11.4	9	4.8	5
16	CLHP0003/CLHP0005&HPYL1848	11.6	7	3.5	12
17	CLHP0049/CML297&HPYL1830	9.8	22	4.1	9
18	CLHP0049/CML297&HPYL1846	5.5	24	7.2	1
19	CLHP0003/CLHP0005&CML304	14.0	1	2.2	19
20	HPL14460/CLHP0020&(CLHP0345//CLHP0005/(KUICAROTENOIDSYN-FS17-3-2-B*3/(KU1409/DE3/KU1409)-B-B-18-2-B)-B-1(MAS:L4H1)-4-B*4//CLHP0005)-B-89-2-2-1-B	11.2	12	2.6	17
21	CLHP0049/CML297&(CLHP0345//CLHP0005/(KUICAROTENOIDSYN-FS17-3-2-B*3/(KU1409/DE3/KU1409)-B-B-18-2-B)-B-1(MAS:L4H1)-4-B*4//CLHP0005)-B-89-2-2-1-B	13.0	2	2.1	20
22	CLHP00286&CSL1683	12.3	3	4.1	10
23	Testigo 1	11.1	13	1.3	23
24	Testigo2	10.7	18	0.9	24
	Promedio	10.9		3.4	
	LSD (0.05)	3.2		5.0	
	CV	15		44	
	Mejor híbrido	14.0		1.5	
	Diferencia	2.9		0.9	
	Significación	ns		ns	

No hay diferencia significativa ni para el rendimiento ni para la pudrición de mazorca, porque los valores de las comparaciones fueron 2.9 y 0.9, inferiores a los valores de LSD 3.2 y 5.0, respectivamente.



La estrategia que se quiere ensayar y promover es aprovechar el alto potencial de rendimiento y mayor contenido de ProA para que las gallinas ponedoras puedan producir huevos con yema amarilla con alta ProA y de esta forma beneficiar a la población que consume huevos en su dieta. Se evaluó también la pudrición de mazorca sin diferencia entre la pudrición del mejor híbrido y la del testigo (Tabla 11).

La investigación y promoción de los maíces bifortificados con alto contenido de Zn y provitamina A debería ser una prioridad de los países para beneficiarse de este atributo, principalmente para los consumidores de áreas rurales con difícil acceso a los programas de suplementación, pero que sí podrían producir estos cultivos biofortificados.

MAÍZ DE ALTA CALIDAD DE PROTEÍNA

Se denomina maíces de alta calidad de proteína a aquellos que poseen granos con mayor contenido de lisina y triptófano que los maíces normales. La lisina y el triptófano son dos aminoácidos esenciales para el hombre y para los animales monogástricos. Originalmente se denominaron maíces opacos por la apariencia suave (no translúcida) del endospermo [37]. Esta característica está dada por un gen recesivo denominado σ_2 , ubicado en el cromosoma 7 del genoma de maíz.

El endospermo suave de los maíces opacos determina efectos pleiotrópicos negativos como disminución de rendimiento hasta en 25 % y susceptibilidad a pudrición de mazorca y daño de insectos en granos almacenados [38,39]. Muchas instituciones y personas en el mundo trabajaron para superar estas deficiencias. Cuando esto fue conseguido, el CIMMYT denominó a estos nuevos maíces de endospermo duro y alta calidad de proteína como QPM, por sus siglas en inglés de Quality Protein Maize [40].

Investigadores [40] indican que el mejoramiento del QPM debe incluir tres distintos sistemas genéticos. En principio, el alelo recesivo σ_2 regula la síntesis de zeína. Las zeínas son las proteínas más abundantes en el endospermo del maíz y se caracterizan por su bajo contenido de lisina y triptófano. El alelo σ_2 al estado homocigota produce una disminución significativa de zeína y un incremento de proteínas con mayor contenido de lisina y triptófano. El segundo sistema está relacionado con la presencia de genes modificadores de la textura del endospermo, lo que permite convertir el endospermo suave en endospermo duro, cristalino, sin perder los valores de lisina y triptófano. La identificación de estos granos cristalinos es relativamente sencilla con el uso de una caja translúcida, que permite discriminar las diferentes texturas del grano, desde opaco hasta translucido. El tercer sistema está relacionado con la presencia de genes modificadores de la cantidad de lisina y triptófano en el endospermo. Para el caso de lisina, el maíz normal tiene un promedio de 2 % y el QPM de 4 % (expresado en porcentaje del total de proteína); sin embargo, el rango de variación en maíces normales oscila entre 1.6 y 2.6, y en el QPM entre 2.7 y 4.5. Para el caso del triptófano, el maíz normal tiene un promedio de 0.4 % y el QPM de 0.8 % (expresado en porcentaje del total de proteína); sin embargo, el rango de variación en maíces normales oscila entre 0.2 y 0.5, y en el QPM entre 0.5 y 1.1. El contenido de lisina y triptófano está altamente correlacionado y solo uno de ellos podría ser necesario en los análisis de calidad proteica. En la práctica, se suele analizar el triptófano porque su determinación



es menos costosa. Estos genes modificadores de la cantidad de aminoácidos han sido mapeados en los cromosomas 3, 4 y 7 del maíz.

En el Perú se iniciaron las investigaciones sobre el uso de los maíces de alta calidad proteica en la sexta década del siglo pasado, tan pronto se conocieron las cualidades de estos tipos de maíz [41]. El mismo autor también menciona la introducción del gen o_2 en algunos compuestos raciales del Perú teniendo cuidado en mantener tanto la variabilidad genética como la calidad nutritiva. Al finalizar el año 1970 se introdujeron, del CIMMYT, los pooles andinos I, II y III, homocigotas para el gen o_2 , que fueron cruzados con 24 compuestos raciales de la sierra. Según Borbor (1995), mencionado por [41], después de dos retrocruzas el fenotipo de las razas peruanas se recuperó rápidamente, el pool andino I fue el mejor donante para las razas de grano grande de la costa central y del sur de Perú; mientras que para las razas de la sierra norte fue el Pool II. En esta época también se recibieron del CIMMYT varias poblaciones segregantes para el gen o_2 , entre ellas el Compuesto J, que luego de 10 ciclos de selección permitió formar la variedad Opaco Huascarán o PMV-580. Esta variedad se utilizó como fuente de resistencia de enfermedades foliares [41] y como forraje para la alimentación animal, principalmente en el sur del país [27].

Se reporta un estudio de la adaptación de cultivares de maíz de alta calidad proteica en Cajamarca [42], en el que se destaca al Compuesto I como cultivar adaptado a las condiciones de la sierra media a alta. Su uso ha sido principalmente como forraje para alimentación de vacunos.

Posteriormente, se describe la formación de variedades con el gen o_2 desarrolladas por el Programa Cooperativo de Investigaciones en Maíz (PCIM) de la UNALM: entre ellas la PMS-266, formada por líneas de la raza Perla, y la PMS-267, formada por líneas centroamericanas [27].

El mismo autor [27] evaluó híbridos normales y opacos en dos localidades de Perú en los años 1973 y 1974, entre los que observó entre 12 % y 16 % mayor rendimiento de los maíces normales. Cuando se evaluaron sintéticos amiláceos de alta calidad de proteína y variedades amiláceas locales en tres localidades de Perú, se observó que el rendimiento promedio de los sintéticos de alta calidad de proteína fue 5.1 t/ha comparado con 1.4 t/ha de los maíces amiláceos locales.

Otros autores [43] evaluaron el valor biológico del maíz opaco 2 en cancha y mote, y demostraron que los granos no perdían la calidad proteica cuando se tostaban o hervían para elaborar cancha o mote, respectivamente.

El año 2007, el INIA liberó el híbrido de alta calidad de proteína, INIA-611 Nutri Perú, con alto potencial de rendimiento, superior a las 10.0 t/ha con buena adaptación para las condiciones de la costa y la selva del país [44]. Este es un híbrido simple formado por 2 líneas homocigotas desarrolladas por el CIMMYT. Ha sido liberado en al menos 5 países de América Latina y Asia, lo que es una indicación de su buena adaptación a diferentes ambientes. Los granos del híbrido son de color amarillo-naranja de muy buena aceptación por los agricultores y avicultores de Perú, ventaja que debería ser aprovechada.



DESAFÍOS Y OPORTUNIDADES

El problema de la malnutrición e inseguridad alimentaria, no solo en el Perú sino en todo el mundo, es multifacético. En este sentido, se requieren estrategias que aborden eficazmente una enmarañada y confusa interacción de factores agronómicos, socioeconómicos, políticos, institucionales, psicológicos y cognitivos. Comprender estos factores es vital [3]. Los 24 millones de personas con hambre aguda que se sumaron al problema en 2023, reflejan esta interacción. Hay una seria crisis alimentaria y un deterioro marcado de la seguridad alimentaria que supera con creces los niveles registrados antes de la pandemia del COVID-19 [16].

En Perú, el impacto negativo de los factores adversos causados por El Niño se reflejó en la contracción de la economía en 2023 (BCRP, citado por [45]). La producción agrícola disminuyó en 4.1 %, la peor desde 1992 (IPE, febrero de 2024, citado por [45]). Se viene manifestando una leve recuperación luego de las repercusiones de la pandemia, pero los precios se han disparado sobre todo en los cereales, menestras y aceites [45].

Además del incremento de la población y el incremento de las necesidades de producción de alimentos, para el año 2050 se prevé que solo el 30 % de la población vivirá en el campo, mientras que el resto vivirá en las ciudades. Este cambio demográfico requiere una reorientación de los sistemas alimentarios para atender las nuevas poblaciones citadinas y erradicar el hambre oculta, la malnutrición y la inseguridad alimentaria [4].

Por otro lado, a nivel mundial no existen estimaciones globales o regionales que combinen las diferentes formas de desnutrición infantil, como retraso en el crecimiento y sobrepeso o retraso en el crecimiento y emaciación [15], y este es un desafío muy serio. Frente a este escenario sombrío, el avance en el conocimiento de las propiedades de la biodiversidad de cultivos alimenticios nos brinda la oportunidad de mejorar los sistemas alimentarios con dietas saludables y nutritivas, especialmente para las poblaciones vulnerables como las de zonas altoandinas.

En 2023, se cumplieron 20 años desde la introducción de la biofortificación para mejorar el valor nutricional de los cultivos básicos, mediante el fitomejoramiento selectivo [2], y no existen dudas sobre sus beneficios económicos y su influencia en la seguridad alimentaria y los medios de vida de los productores. No obstante, se debe trabajar en la aceptación por parte de los agricultores y consumidores, así como en el contexto sociocultural [11]. Una vez que se capitalice la adopción y/o aceptación es imperante el acceso a semillas de calidad, en forma oportuna, en cantidad suficiente y a un precio justo. El acceso a semillas de calidad es una barrera que, por años, enfrentan los agricultores de países en vías de desarrollo. Para vencer esta limitante es necesario fortalecer la capacitación, mostrar *in situ* la adaptación y ventajas de producir cultivos biofortificados y a la vez enlazar a los productores con el mercado en condiciones ventajosas.

En varios países de América Latina el estado cuenta con programas sociales que promueven la compra y consumo de alimentos para poblaciones en riesgo. Es posible comprar de manera directa a los agricultores los alimentos biofortificados



que producen para destinarlos a programas sociales. En Perú existen seis programas dirigidos a niños menores de cinco años. Con mayor presencia en la Encuesta Nacional de Niveles de Vida [46], aparecen en orden de importancia: Vaso de Leche, Desayunos Escolares, programas que le den papilla a menores como el Programa de Alimentación Complementaria de Focalización (PACFO), los WAWA WASI, el Programa de Alimentación y Nutrición a Familias en Alto Riesgo (PANFAR) y los comedores populares. Existe, por lo tanto, una ventana de comercialización que aún no se ha aprovechado en su totalidad.

RECOMENDACIONES PARA FUTURAS INVESTIGACIONES

Se necesita hacer más investigación antes de poder hacer recomendaciones específicas [7]. Como se mencionó, la biofortificación enfrenta varios desafíos, que van desde cuestiones técnicas en el proceso *per se*, hasta las limitaciones genéticas, la biodisponibilidad, y los obstáculos políticos y regulatorios para lograr su aceptación [11] y sostenibilidad, sin causar impactos negativos en general.

Frente a estos factores adversos existen oportunidades que deben ser tomadas como recomendaciones. Es necesario investigar para biofortificar cereales y menestras para proporcionar dietas equilibradas que reduzcan la desnutrición. En este sentido es necesario utilizar las nuevas alternativas de mejoramiento, como la edición genética, la sobreexpresión de genes y la transferencia de genes de parientes silvestres, para obtener cultivos con perfiles nutricionales óptimos [11].

El Estado debe pensar que la biofortificación puede ser una excelente alternativa para llegar a las poblaciones donde la suplementación y las actividades de fortificación convencional son difíciles de implementar. En este sentido, se debe ampliar la investigación en biofortificación, con hierro en arroz, frijoles, camote, yuca y leguminosas; con zinc en trigo, arroz, frijoles, camote y maíz; con provitamina A en papa, maíz y yuca; y con aminoácidos y proteínas en maíz y yuca.

CONCLUSIONES

En el Perú, existe una amplia base genética de maíz sustentada en la existencia de más de 50 razas, una de ellas es la raza Kcully que ha dado origen a variedades con alta concentración de antocianina. El MIDAGRI describe 10 variedades de maíz morado, seis son las más conocidas y cuatro variedades mejoradas.

La UNALM y el INIA vienen estudiando más ampliamente la adaptación de 5 variedades de maíz morado en 30 localidades de diferentes regiones del país. Los resultados preliminares de campo son muy prometedores y auspician un buen estudio de la interacción genotipo ambiente. Con la cuantificación de antocianinas de cada variedad en cada localidad se tendrá mayor información de la adaptación de las variedades a las diferentes condiciones ambientales del país y su variación en el contenido de antocianinas.



En los últimos 20 años la producción de maíz morado en el Perú se ha cuadruplicado por el incremento de tres veces la superficie sembrada y por el aumento del 12 % en el rendimiento. El mayor consumo de maíz morado ha sido el factor determinante en las tendencias observadas.

La exportación del maíz morado se ha triplicado entre 2010 y 2020. Actualmente, se exportan 1242 toneladas por un valor de 1542 millones de dólares. Estados Unidos y la Unión Europea son los principales destinos y representan el 70 % de las exportaciones.

Existen variedades de libre polinización e híbridos promisorios de maíz biofortificado con Zn con alto potencial de rendimiento, tanto en la costa como en la sierra. Estos son superiores a las variedades e híbridos no biofortificados, ventaja que debe ser aprovechada por los consumidores a nivel nacional.

Se ha determinado que el híbrido experimental CLTHW16138 posee alto rendimiento (superior a 13.0 t/ha) y un contenido de Zn muy alto (44.5 ppm), por lo tanto, es un candidato para ser liberado si se ratifica este comportamiento en posteriores evaluaciones. Los híbridos con cantidades de Zn mayores a 37 ppm pueden servir como fuentes para la obtención de germoplasma con esta característica.

Los maíces biofortificados tienen más de 10 ppm de ProA comparado con 2 ppm de los normales. La investigación y promoción de maíz amarillo biofortificado con ProA puede ser una alternativa viable en el Perú y el mundo ya que las gallinas ponedoras que consuman este tipo de maíz producirían huevos con yemas con mayor contenido de ProA que beneficiaría a la población rural y urbana. El híbrido simple CLHP0003/CLHP0005&CML304 tiene un potencial de rendimiento superior a 14.0 t/ha, superior al del mejor híbrido simple no biofortificado.

El año 2007, INIA liberó el híbrido INIA-611 con alta calidad de proteína y alto potencial de rendimiento, superior a las 10.0 t/ha [44]. Este es un híbrido simple formado por dos líneas homocigotas desarrolladas por el CIMMYT y ha sido liberado en al menos cinco países de América Latina y Asia lo que indica su adaptación en diferentes ambientes. Los granos del híbrido son de color amarillo-naranja de muy buena aceptación por los agricultores y avicultores de Perú.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Luis Narro León y Alexander Chávez Cabrera concibieron las investigaciones. Luis Narro León desarrolló la metodología; Alexander Chávez Cabrera, Kryss Vargas Gutiérrez y Camilo Velásquez Leveaú trabajaron en la adquisición de fondos y la provisión de recursos. Luis Narro León, Alexander Chávez Cabrera, Peter Piña Díaz, Fernando Escobal Valencia, Alicia Medina Hoyos, Teodoro Narro León, Roberto Alvarado Rodríguez, Mercedes Escalante Vega, Gilberto García Pando, Pedro Carrillo Zavala, Raihil Rengifo Sánchez, Elizabeth Ricse Belen, Demetrio Flores Mendoza, Willian Huamanchay Rodríguez y Ronal Otiniano Villanueva realizaron el trabajo de campo. Luis Narro León redactó el manuscrito y, junto con Alexander Chávez Cabrera revisaron críticamente el contenido intelectual del manuscrito y editaron el documento.



AGRADECIMIENTOS

Los experimentos de maíz morado con alto contenido de antocianinas y de maíz biofortificado con zinc y maíz biofortificado con ProA, fueron financiados por el Proyecto de Inversión 2361771: “Mejoramiento de la disponibilidad, acceso y uso de semillas de calidad de: papa, maíz amiláceo, leguminosas de grano y cereales, en las regiones de Junín, Ayacucho, Cusco y Puno. 4 departamentos”, del Instituto Nacional de Innovación Agraria de Perú. Los experimentos de maíz biofortificado con zinc y maíz biofortificado con ProA, sembrados en la localidad de Chagualito, fueron financiados por la Asociación Pataz.

Los autores agradecen al Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) por facilitar la semilla experimental de maíces biofortificados para su evaluación en diferentes localidades del Perú y a la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM) por el asesoramiento y ejecución de ensayos en el ámbito de la Universidad. Agradecen también la contribución de Gabriela Eliza Quevedo Rabanal, por haber proporcionado los datos estadísticos relevantes e información necesaria extraída de la SUNAT para elaborar este documento. De igual manera, agradecen a la Red Latinoamericana de Maíz, al Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED) y al proyecto TechMaíz por la difusión de tecnologías para el cultivo de maíz y por haber gestionado la elaboración y publicación de este artículo.

CONFLICTOS DE INTERÉS

Los autores declaran que esta investigación fue conducida en la ausencia de relaciones comerciales o financieras que pudieran constituir un potencial conflicto de interés.

REFERENCIAS

- [1] Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo. (2018). *Expertos mundiales en maíz hablan de la biofortificación para la nutrición y la salud*. CIMMYT. <https://www.cimmyt.org/es/uncategorized/expertos-mundiales-en-maiz-hablan-de-la-biofortificacion-para-la-nutricion-y-la-salud/>
- [2] Philanthropy Cartier. (2023). *20 Years of Biofortification*. Philanthropy Cartier. <https://www.cartierphilanthropy.org/news/20-years-of-biofortification>
- [3] Samuel, L., de Barcellos, M. D., Watabaji, M. D. y De Steur, H. (2024). Factors affecting farmers' acceptance and adoption of biofortified crops: A systematic review. *Outlook on Agriculture*, 53(1), 15-29. doi: <https://doi.org/10.1177/00307270231212924>
- [4] Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia. (2023). *The State of Food Security and Nutrition 2023. Urbanization, agrifood systems, transformation and healthy diets across the rural urban continuum*. UNICEF. <https://data.unicef.org/resources/sofi-2023/>
- [5] Organización para la Alimentación y la Agricultura. (2022). *Hambre e Inseguridad Alimentaria*. FAO. <https://www.fao.org/hunger/es/>
- [6] HarvestPlus. (2024). *Better Crops, Better Nutrition*. HarvestPlus. <https://www.harvestplus.org/>
- [7] World Health Organization. (2023). *Biofortification of staple crops*. World Health Organization. <https://www.who.int/tools/elena/interventions/biofortification>
- [8] Talsma, E. F. y Pachón H. (2017). *Biofortification of crops with minerals and vitamins*. World Health Organization. [https://www.who.int/tools/elena/bbc/biofortification#:~:text=Biofortification%20is%20the%20process%20by,importantly%20to%20farmers%20\(1\).](https://www.who.int/tools/elena/bbc/biofortification#:~:text=Biofortification%20is%20the%20process%20by,importantly%20to%20farmers%20(1).)
- [9] World Health Organization. (2023). *Multiple micronutrient powders for point-of-use fortification of foods consumed by children 6–23 months of age*. World Health Organization. <https://www.who.int/tools/elena/interventions/micronutrientpowder-infants>
- [10] Huey, S. L., Krisher, J. T., Bhargava, A., Friesen, V. M., Konieczynski, E. M., Mbuya, M. N. N., Mehta, N. H., Monterrosa, E., Nyangaresi, A. M. y Mehta, S. (2022). Review of the Impact Pathways of Biofortified Foods and Food Products. *Nutrients*, 14(6), 1200. doi: <https://doi.org/10.3390/nu14061200>
- [11] Ashoka P., Sangeeta, Spandana, B., Saikanth, D. R. K., Kesarwani, A., Nain, M., Pandey, S. K., Singh, B. V. y Maurya, C. L. (2023). Bio-fortification and Its Impact on Global Health. *Journal of Experimental Agriculture International*, 45(10), 106–115. doi: <https://doi.org/10.9734/jeai/2023/v45i102203>
- [12] Sandhu, R., Chaudhary, N., Shams, R., Singh, K. y Pandey, V.K. (2023). A critical review on integrating bio fortification in crops for sustainable agricultural development and nutritional security. *Journal of Agriculture and Food Research*, 14. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100830>.
- [13] Organización para la Alimentación y la Agricultura. (2022). *Hambre e Inseguridad Alimentaria*. FAO. <https://www.fao.org/hunger/es/>
- [14] Baral, A. (2023). *HarvestPlus: Twenty years of enriching diets with biofortification*. International Food Policy Research Institute. <https://www.ifpri.org/blog/harvestplus-twenty-years-enriching-diets-biofortification>
- [15] United Nations Children's Fund, World Health Organization, International Bank for Reconstruction and Development/ The World Bank. (2023). *Levels and trends in child malnutrition*. UNICEF, WHO, World Bank Group. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240073791>
- [16] World Bank. (2024). *Food Security Update 2024*. World Bank. <https://thedocs.worldbank.org/en/doc/40ebbf38f5a6b68bfc11e5273e1405d4-0090012022/related/Food-Security-Update-CV-April-25-2024.pdf>
- [17] Verano, P. (2024). El Perú registra su peor situación nutricional de los últimos 10 años, según el Índice Global del Hambre 2023. *Radio Programas del Perú*. <https://rpp.pe/peru/actualidad/indice-global-del-hambre-2023-peru-registra-su-peor-situacion-nutricional-de-los-ultimos-10-anos-noticia-1518461>
- [18] Maqbool Muhammad, A., Beshir Issa, A. y Khokhar Ehtisham, S. (2021). Quality protein maize (QPM): Importance, genetics, timeline of different events, breeding strategies and varietal adoption. *Plant Breeding*, 140, 375–399. doi: <https://doi.org/10.1111/pbr.12923>

- [19] Tian, X. Z. Paengkoum, P., Paengkoum, S., Chumpawadee, S., Ban, C. y Thongpea, S. (2019). Short communication: Purple corn (*Zea mays* L.) stover silage with abundant anthocyanins transferring anthocyanin composition to the milk and increasing antioxidant status of lactating dairy goats. *Journal of Dairy Science*, 102(1), 413–418. doi: <https://doi.org/10.3168/jds.2018-15423>
- [20] Tian, X., Xin, H., Paengkoum, P., Paengkoum, S., Ban, C. y Sorasak, T. (2019). Effects of anthocyanin-rich purple corn (*Zea mays* L.) stover silage on nutrient utilization, rumen fermentation, plasma antioxidant capacity, and mammary gland gene expression in dairy goats 1. *Journal of Animal Science*, 97(3), 1384–1397. doi: <https://doi.org/10.1093/jas/sky477>
- [21] Monroy, Y. M., Rodrigues, R. A. F., Sartoratto, A. y Cabral, F. A. (2020). Purple corn (*Zea mays* L.) pericarp hydroalcoholic extracts obtained by conventional processes at atmospheric pressure and by processes at high pressure. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 37: 237-248. doi: <https://doi.org/10.1007/s43153-020-00009-x>
- [22] Moreno-Loaiza, O. y Paz-Aliaga, A. (2010). Efecto vasodilatador mediado por óxido nítrico del extracto hidroalcohólico de *Zea mays* L. (maíz morado) en anillos aórticos de rata. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, 27(4), 527-531. doi: http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=51726-46342010000400006&lng=es&tlng=es
- [23] Heras, I., Alvis, A. y Arrazola, G. (2013). Optimización del Proceso de Extracción de Antocianinas y Evaluación de la Capacidad Antioxidante de Berenjena (*Solanum melongena* L.). *Información tecnológica*, 24(5), 93-102. doi: <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642013000500011>
- [24] Medina-Hoyos, A., Narro-León, L. A. y Chávez-Cabrera, A. (2020). Cultivo de maíz morado (*Zea mays* L.) en zona altoandina de Perú: Adaptación e identificación de cultivares de alto rendimiento y contenido de antocianina. *Scientia Agropecuaria*, 11(3), 291-299. doi: <https://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2020.03.01>
- [25] Grobman Tversqui, A. (2004). Origen del Maíz. En *Cincuenta años del Programa Cooperativo de Investigación en Maíz* (pp 537). Universidad Nacional Agraria La Molina.
- [26] Grobman Tversqui, A., Salhuana, W., Sevilla Panizo, R. y Mangelsdorf, P. C. (1961). *Races of Maize in Perú. Their origins, evolution and classification*. National Research Council.
- [27] Manrique Chávez, A. (1997). *El maíz en el Perú*. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONCYTEC).
- [28] Ministerio del Ambiente. (2018). *Línea de base de la diversidad genética del maíz peruano con fines de bioseguridad*. Ministerio del Ambiente.
- [29] Garzón, G. A. (2008). Las antocianinas como colorantes naturales y compuestos bioactivos: Revisión. *Acta Biológica Colombiana*, 13(3), 27-36. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-548X2008000300002&lng=en&tlng=es.
- [30] Guillén-Sánchez, J., Mori-Arismendi, S. y Paucar-Menacho, L.M. (2014). Características y propiedades funcionales del maíz morado (*Zea mays* L.) var. subnigrovioláceo. *Scientia Agropecuaria*, 5(4), 211-217. doi: <https://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2014.04.05>
- [31] Espinosa-Trujillo, E. (2012). *Bioquímica y Genética de las Antocianinas del Grano de Maíz*. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. (INIFAP).
- [32] Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego. (2021). *El maíz morado peruano: Un producto con alto contenido de antocianina, poderoso antioxidante natural*. Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego.
- [33] Instituto Nacional de Innovación Agraria. (2014). Maíz INIA 601: Variedad mejorada de maíz morado para la sierra norte del Perú. Instituto Nacional de Innovación Agraria. <http://repositorio.inia.gob.pe/handle/20.500.12955/65>
- [34] García-Oliveira, A.L., Chander, S., Ortiz, R., Menkir, A. y Gedil, M. (2018). Genetic Basis and Breeding Perspectives of Grain Iron and Zinc Enrichment in Cereals. *Front. Plant Sci.*, 9, 937. <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2018.00937>
- [35] Bouis, H. E. y Saltzman, A. (2017). Improving nutrition through biofortification: A review of evidence from HarvestPlus, 2003 through 2016. *Global Food Security*, 12, 49-58. doi: [10.1016/j.gfs.2017.01.009](https://doi.org/10.1016/j.gfs.2017.01.009)
- [36] Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo. (2015). *Nuevas tecnologías para incrementar la rentabilidad del sistema café-maíz*. CIMMYT. <https://www.cimmyt.org/es/uncategorized/nuevas-tecnologias-para-incrementar-la-rentabilidad-del-sistema-cafe-maiz/>

- [37] Mertz E.T., Bates L.S. y Nelson O.E. (1964). Mutant gene that changes protein composition and increases lysine content of maize endosperm. *Science*, 145, 279-280. <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.145.3629.279>
- [38] Vasal S.K. (2000a). The Quality Protein Maize Story. *Food and Nutrition Bulletin*, 21(4), 445-450. doi:10.1177/156482650002100420
- [39] Vasal, S.K. (2000b). High Quality Protein Corn. En Hallauer, A.R. (Ed). *Specialty Corns* (pp 85-130). CRC Press.
- [40] Krivanek, A., De Groot, H., Gunaratna N.S., Diallo A. O. y Friese D. (2007). Breeding and disseminating quality protein maize (QPM) for Africa. *African Journal of Biotechnology*, 6(4), 312-324. <http://www.academicjournals.org/AJB>
- [41] Sevilla, R. (2003). Mejoramiento de maíz en la sierra del Perú. En *Cincuenta años del Programa Cooperativo de Investigación en Maíz* (pp 537). Universidad Nacional Agraria La Molina.
- [42] Narro, L. A. (1977). *Adaptación de cultivares de maíz de alta calidad proteica en Cajamarca - Informe Técnico N° 94*. INIACRIAN.
- [43] Aguilar, T., Manrique A. y Rojas V. (1974). *Valor biológico del maíz opaco-2 en cancha y mote*. Archivos Latinoamericanos de Nutrición.
- [44] Instituto Nacional de Innovación Agraria. (2007). *Maíz Amarillo Duro INIA 611 Nutri-Perú híbrido simple de alta calidad proteica*. Instituto Nacional de Innovación Agraria. <https://repositorio.inia.gob.pe/handle/20.500.12955/625>
- [45] Food Security Information Network. (2024). Latin America and The Caribbean. *2024 Global Report on Food Crises*. FSIN. <https://www.fsinfo.org/sites/default/files/resources/files/GRFC2024-regional-lac-CoC.pdf>
- [46] Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2022). *Perú - Encuesta Nacional de Hogares sobre Condiciones de Vida y Pobreza 2021*. INEI. http://webinei.inei.gob.pe/anda_inei/index.php/catalog/745
- [47] Steel, R.G.D. y Torrie, J.H. 1985. *Bioestadística: Principios y Procedimientos*. McGraw-Hill Latinoamérica.

Identificación de parásitos gastrointestinales en aves acuáticas de la laguna Yahuarcocha, Imbabura, Ecuador

Ivi Flores Cabezas¹, Fernando Pazmiño Galarza², Nathaly Reyes Calupiña³, Karla Mena Martínez³, Augusto Luzuriaga-Neira⁴, Leonardo Cedeño Jiménez³, Nivia Luzuriaga-Neira^{3*}

¹Escuela de Salud Pública, Universidad San Francisco de Quito, Diego de Robles y Vía Interocéánica, EC 170901 Quito, Ecuador.

²Laboratorio de Parasitología, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Central del Ecuador, Jerónimo Leiton y Gatto Sobral s/n, EC 170521, Quito Ecuador.

³Unidad de Estudios de la Vida Silvestre, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Central del Ecuador, Jerónimo Leiton y Gatto Sobral s/n, EC 170521, Quito, Ecuador.

⁴Department of Ornithology, American Museum of Natural History, New York, 10024 NY. USA.

*Autor para correspondencia: nluzuriaga@uce.edu.ec

Identification of gastrointestinal parasites in waterfowl at Yahuarcocha lagoon, Imbabura, Ecuador

Resumen

La parasitosis en aves silvestres constituye una línea de estudio de vital importancia dentro de la ecología y de la salud animal. Este tipo de infecciones, causadas por una variedad de parásitos, pueden afectar significativamente la salud, el comportamiento y la dinámica de las poblaciones de aves. La interacción entre parásitos y sus hospedadores aviares es compleja y puede estar modulada por factores ambientales, genéticos y comportamentales. Comprender estos procesos es esencial para el manejo de la fauna silvestre y la preservación de la biodiversidad, así como para la prevención de enfermedades zoonóticas que pueden afectar a los humanos. Las infecciones parasitarias en aves silvestres son de amplia distribución y su ocurrencia es a nivel mundial; la mayor cantidad de casos presentados en estas son de carácter subclínico debido a las bajas concentraciones parasitarias. Se analizaron un total de 48 muestras de cinco especies de aves acuáticas de la laguna Yahuarcocha, se determinó la prevalencia, intensidad de infestación y coinfección de huevos y ooquistes de parásitos contenidas en las heces de las aves. Se utilizaron dos técnicas de diagnóstico: método coproparasitológico directo (método cualitativo) y la técnica de McMaster con solución de Sheater (método cuantitativo). Se identificaron cuatro géneros de parásitos en 23 aves: *Ascaridia galli*, *Heterakis gallinarum*, *Capillaria* sp., y *Eimeria* spp. Se estimó una prevalencia del 48 % (23/48), las cuales presentaron al menos uno de los géneros o especies identificadas. La prevalencia por hospedador fue del 60 % (3/5) en la Gallineta común; 50 % (9/18) en la Focha andina; 47% (8/17) en el Cormorán neotropical; 40 % (2/5) en el Pato rojizo andino; y 33% (1/3) en la Garza bueyera. Con respecto a la intensidad de infestación, las aves presentaron valores promedio de 271 (± 74) huevos por gramo de heces (HPG) de *A. galli*; 275 (± 98) HPG de *H. gallinarum*; 125 (± 25) HPG de *Capillaria* sp. y de 236 (± 139) ooquistes por gramo (OPG) de *Eimeria* spp. Se determinó el 30.43 % (7/23) de infecciones mixtas con mayor frecuencia de: *H. gallinarum* y *Eimeria* spp. en dos hospedadores.

Palabras clave: abundancia de parásitos, aves acuáticas silvestres, infecciones mixtas,



Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /
Edited by:
Mateo Dávila

Recibido /
Received:
23/04/2024

Aceptado /
Accepted:
20/06/2024

Publicado en línea /
Published online:
06/08/2024



Abstract

Parasitism in wild birds is an area of study of vital importance within ecology and animal health. These infections, caused by a variety of parasites, can significantly impact the health, behavior, and dynamics of bird populations. The interaction between parasites and their avian hosts is complex and can be influenced by environmental, genetic, and behavioral factors. Understanding these processes is crucial for wildlife management, biodiversity preservation, and the prevention of zoonotic diseases that can affect humans. Parasitic infections in wild birds are widely distributed globally, with many cases being subclinical due to low parasite concentrations. A total of 48 samples from five species of waterfowl from Yahuarcocha lagoon were analyzed to determine prevalence, infestation intensity, and co-infection of parasite eggs and oocysts in bird feces. Two diagnostic techniques were used: direct coproparasitoscopic method (qualitative) and McMaster technique with Sheater's solution (quantitative). Four genera of parasites were identified in 23 birds: *Ascaridia galli*, *Heterakis gallinarum*, *Capillaria sp.*, and *Eimeria spp.* The prevalence was estimated at 48 % (23/48), with at least one of the identified genera or species. Host-specific prevalence was 60 % (3/5) in the Common Gallinule; 50 % (9/18) in the Andean Coot; 47 % (8/17) in the Neotropical Cormorant; 40 % (2/5) in the Andean Ruddy Duck; and 33 % (1/3) in the Cattle Egret. Regarding infestation intensity, birds showed average values of 271 (± 74) eggs per gram (EPG) of *A. galli*; 275 (± 98) EPG of *H. gallinarum*; 125 (± 25) EPG of *Capillaria sp.*, and 236 (± 139) oocysts per gram (OPG) of *Eimeria spp.* Mixed infections were found in 30.43 % (7/23) of cases, most commonly involving *H. gallinarum* and *Eimeria spp.* in two hosts.

Keywords: parasite abundance, aquatic wild birds, mixed infections, parasites

INTRODUCCIÓN

La parasitosis en aves silvestres constituye un área de estudio de vital importancia dentro de la ecología y de la salud animal. Esta puede ser producida por diferentes agentes parasitarios tales como: nematodos, cestodos, trematodos y distintos tipos de protozoarios que pueden afectar la salud, el comportamiento y la dinámica de las poblaciones de aves. Los parásitos, que van desde protozoos microscópicos hasta gusanos macroscópicos, pueden influir en la supervivencia y en el éxito reproductivo de las aves [1]. Las aves acuáticas silvestres son organismos propensos a infestarse de manera natural por una gran diversidad de parásitos gastrointestinales que las afectan [1,2]. Estos organismos pueden ser adquiridos de forma directa por el consumo de alimento contaminado con formas infestantes [3], por contacto continuo con los elementos del medio, o indirectamente a través de hospedadores intermediarios [4]. El grado de parasitismo suele depender de factores biológicos como edad, sexo, condición fisiológica (madurez) del individuo y de los factores asociados al hábitat [5]. Actualmente se ha determinado que ciertas aves migratorias, con hábitos gregarios, son portadoras y posibles diseminadoras de una gran diversidad de patógenos como parásitos, virus y bacterias; un ejemplo claro de esto es la presencia en el Pato Triguero (*Anas platyrhynchos diazi*), del altiplano zacatecano de México, de *Echinostomum revolutum*, *Capillaria sp.* y *Polymorphus ondatrae* [6,7].



Estudios previos han evidenciado interacciones parasitarias de las aves costeras en diferentes niveles de la cadena trófica que incluyen peces [8] y crustáceos decápodos [9] que son hospedadores de una diversidad de helmintos (ej. digeneos, nemátodos y céstodos). Estos organismos, a su vez, constituyen el alimento principal de las aves como en el caso del Piquero de Patas Azules (*Sula nebouxii*) y otras aves de la familia Ardeidae [10]. A nivel regional existen importantes estudios sobre las diferentes parasitosis en aves silvestres acuáticas y terrestres que incluyen varios géneros [11,12,13] y especies en particular [14,15,16].

En contraste, en el Ecuador existen pocas aproximaciones al estudio de los endoparásitos de las aves de los hábitats acuáticos continentales, no obstante, importantes resultados han sido publicados sobre especies de ambientes particulares como las islas Galápagos [17,18] y ambientes urbanos [19]. En la laguna Yahuarcocha se han realizado estudios orientados a determinar: las tendencias temporales en las poblaciones aviares silvestres [20,21], los indicadores limnológicos, los niveles de eutrofización [22,23,24,25] y los efectos de ésta sobre los peces [26]. Sin embargo, se observa un vacío en el estudio de otros agentes como los microorganismos asociados a la fauna silvestre. En este contexto, el objetivo principal del estudio fue determinar y caracterizar los parásitos gastrointestinales de las aves comunes de laguna Yahuarcocha.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación y características del sitio de estudio

La laguna de Yahuarcocha está situada en el norte del Ecuador, en la provincia de Imbabura; geográficamente se ubica entre 00° 22' 300 N y 78° 06' 100 O a una altitud de 2 192 m s.n.m. Presenta una temperatura anual media de 20 a 25 °C [26], con una superficie 230 hectáreas, un máximo de 7.9 metros (m) de profundidad y 12.7 millones de metros cúbicos (m³) de agua [25]. La laguna se encuentra en un proceso acelerado de eutrofización promovido por la colonización de cianobacterias del género *Cylindrospermopsis* sp. y los altos valores de conductividad y alcalinidad [23].

En la laguna existen aproximadamente 19 especies de aves acuáticas, donde la especie predominante es la Focha Andina (*Fulica ardesiaca*), y el Cormorán Neotropical (*Phalacrocorax brasilianus*) [22]. La vegetación superficial está dominada por la Totorá (*Scirpus californicus*) y la vegetación acuática por *Potamogeton pusillus* [26]. La fauna ictica está compuesta por especies introducidas como: el pez cola de espada (*Xiphophorus hellerii*), el pez Guppy (*Poecilia reticulata*), la carpa común (*Carassius auratus*) y la Tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*) [27].

Método de muestreo

La colecta de muestra fecal por especie se realizó en marzo del 2018 en cuatro días con un esfuerzo total de 12 horas (3h/jornada). La captura de las aves se realizó a través de un método combinado de trampas de red, distracción lumínica nocturna [28], y captura manual directa en los dormideros con el uso de un bote acuático entre las 20h00 a 23h00. Las aves capturadas fueron colocadas en jaulas tipo huacal hasta ser examinadas



y manipuladas. Cada individuo fue marcado con un anillo auxiliar de color previo a la liberación para evitar el doble muestreo. Las heces de todas las aves fueron colectadas de forma individual (3-5 g) en el sitio de estudio en la jaula de descanso por defecación espontánea en un tiempo máximo de 10 minutos, y no se administró ningún tipo de fármaco para la obtención de las muestras. Previo a la liberación de los individuos en los sitios de captura, se realizó un examen físico externo a cada ave para asegurar su bienestar. Ningún ave tuvo signos de traumatismos externos o visibles al momento de la examinación y posterior liberación.

Métodos de diagnóstico y cuantificación

Para la identificación y cuantificación de parásitos gastrointestinales se obtuvo una muestra de heces de al menos 4 g, de los cuales se utilizó al menos 1 g para la técnica directa o frotis fecal fresco y 3 gramos para la cuantificación parasitaria por la Técnica de McMaster [29,30,31,32]. Para realizar el frotis fecal fresco se colocaron por separado una gota de solución salina (0,85 %) y una gota de solución de Lugol (4 %) en un portaobjetos. Colocamos una pequeña cantidad de heces, la mezclamos de forma independiente con cada gota y cubrimos la muestra con un cubreobjetos. Los portaobjetos con el frotis fecal fresco se llevaron al microscopio y se examinaron con un aumento total de 100x y 400x para verificar las especies parasitarias [33].

Para el procesamiento de muestras fecales mediante el método McMaster preparamos una suspensión de heces (2 gramos) con 28 ml de solución de flotación SF5 - solución Sheater (454 g NaCl + 355 ml de agua + 6 ml de formaldehído, gravedad específica 1,25 mg/dl) para cada muestra. Homogeneizamos cuidadosamente la muestra fecal durante aproximadamente 30 segundos (dependiendo de la consistencia de la muestra) mezclándola con una espátula de madera, y pasándola por un colador. Utilizando una pipeta Pasteur, en un ángulo de 45 grados, trasladamos la solución obtenida previamente a cada una de las cámaras. Dejamos que los huevos floten 5 minutos y se peguen a la rejilla. Luego miramos bajo el microscopio; el valor total de huevos de cada cámara fueron sumados y multiplicados por un factor de cincuenta (50) para obtener el número de huevos por gramo de heces (HPG) o de ooquistes por gramo de heces (OPG) [34].

Análisis estadístico

Todos los datos se ingresaron en un archivo de Excel (*Microsoft* 2010). El análisis estadístico se realizó utilizando la versión R-4.2.3. Las especies de aves se trataron como variables categóricas y se presentaron como frecuencias y porcentajes. Cada muestra fue procesada por cada método diagnóstico; la muestra que resultó positiva con cualquiera de los métodos se consideró como verdadero positivo. La variable de respuesta para el modelo de prevalencia de parásitos gastrointestinales comprendía la ausencia o presencia de cualquier género de parásito dentro de cada huésped; la intensidad de la infección se determinó como el número de huevos/ooquiste por gramo de heces; y la coinfección como el número de huevos/ooquistes combinados dentro de cada individuo o de cada individuo infectado. La intensidad de infección fue evaluada considerando los rangos de estimación propuestos por Sabatini *et al.* [34], siendo: leve (< 200 HPG/OPG), moderada (> 200-800 HPG/OPG), y alta (> 800 HPG/OPG).



Resultados

El total de aves capturadas fue 48, de las cuales: el *Cormorán neotropical* (17/48), *Gallinula chloropus* (5/48), *Oxyura jamaicensis* (5/48), *Fulica ardesica* (18/48) y *Bulbucus ibis* (3/48). La prevalencia fue del 48 % (23/48), con al menos un género parasitario. Por especie, la mayor prevalencia corresponde a la Gallineta común 60 % (3/5); seguido de la Focha andina 50 % (9/18), el Cormorán Neotropical 47 % (8/17), el Pato rojizo andino 40 % (2/5) y la Garza bueyera 33 % (1/3) (Tabla 1, Figura 1). Se identificaron cuatro géneros de parásitos; dos a nivel de especie agrupados en tres familias: Ascarididae; Trichinellidae, Eimeriidae (Figura 2)

Tabla 1. Prevalencia de parásitos gastrointestinales en cinco especies de aves de acuáticas de la laguna Yahuarcocha, Imbabura.

Especie/ hospedador	Nombre común	Total -individuos	N individuos parasitados	Prevalencia /sp.
<i>Phalacrocorax brasilianus</i>	Cormorán neotropical	17	8	(47 %)
<i>Gallinula chloropus</i>	Gallineta común	5	3	(60 %)
<i>Oxiura jamaicensis</i>	Pato rojizo andino	5	2	(40 %)
<i>Fulica ardesiaca</i>	Focha andina	18	9	(50 %)
<i>Bulbucus ibis</i>	Garza bueyera	3	1	(33 %)
Total		48	23	

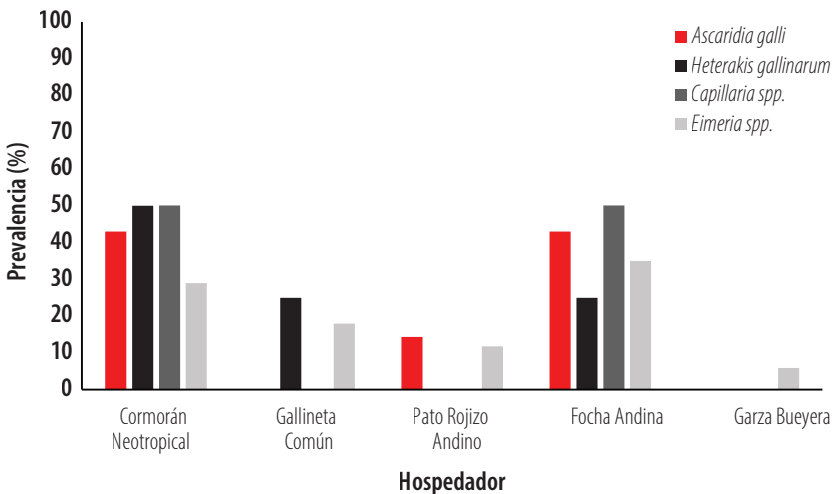


Figura 1. Prevalencia de parásitos gastrointestinales en cinco especies de aves acuáticas de la laguna Yahuarcocha, Imbabura, Ecuador.

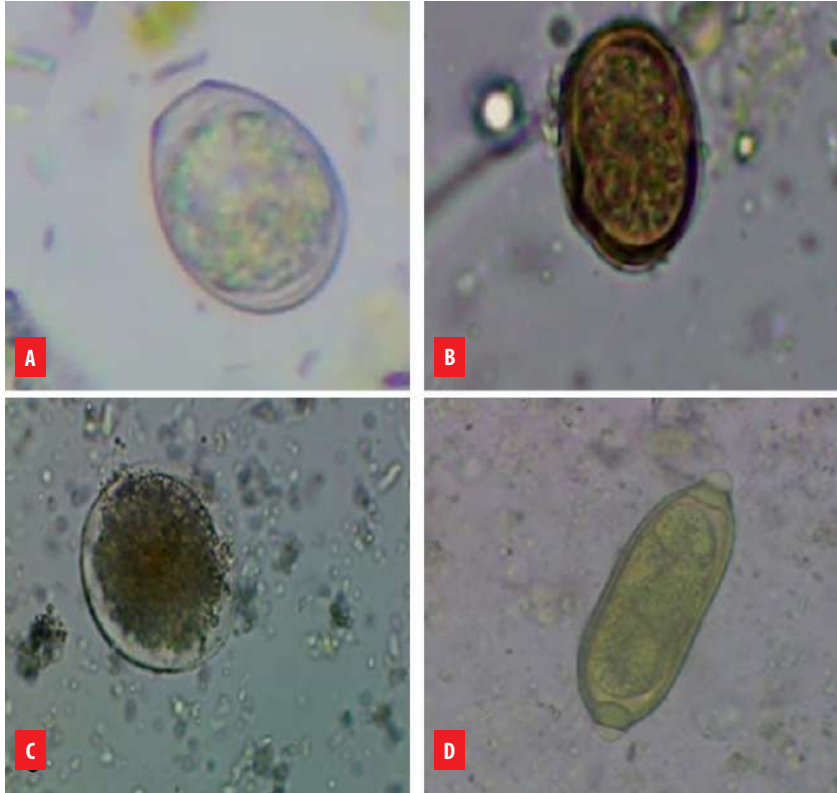


Figura 2. Identificación microscópica (40 x) de endoparásitos en aves acuáticas de la laguna Yahuarcocha, Imbabura, Ecuador: (A) *Ascaridia galli* (FC-Y-40); (B) *Capillaria* spp. (COR-Y-2); (C) *Eimeria* spp (FC-Y-14); (D) *Heterakis gallinarum* (COR-Y-29)

Con respecto a la frecuencia; *Eimeria* sp. (17/23) estuvo presente en las cinco especies hospedadoras con valores de: 35 % (6/17) en la Focha andina, 29 % (5/17) en Cormorán neotropical, y porcentajes más bajos estimados en los tres restantes. Así mismo, *A. galli* estuvo presente en tres de las cinco especies hospedadoras con 43 % (3/7) tanto en el Cormorán neotropical, como en la Focha andina, y 14,3 % (1/7) en el Pato rojizo andino (Figura 2).

Heterakis gallinarum tuvo un rango de frecuencia de 25 % a 50 % en tres especies hospedadores: 50 % (2/4) en el Cormorán neotropical y 25 % (1/4) en Focha andina y Gallineta común.; finalmente *Capillaria* sp. obtuvo 50 % (1/2) en el Cormorán neotropical y en la Focha andina. Adicionalmente, se presentaron infecciones mixtas en siete individuos de cuatro especies, excepto en la Garza bueyera. Las infecciones mixtas identificadas fueron: *A. galli* + *Capillaria* sp. (1/7), *Heterakis* sp. + *Eimeria* spp. (3/7), *Capillaria* sp. + *Eimeria* spp (1/7), *A. galli* + *Eimeria* spp. (2/7) (Tabla 2).



Tabla 2. Frecuencia de parasitismo e infecciones mixtas de parásitos gastrointestinales en cinco especies de aves acuáticas de la laguna de Yahuarcocha, Imbabura.

Prevalencia	Total		Cormorán neotropical		Gallineta común		Pato rojizo andino		Focha andina		Garza bueyera					
	n	n %	n	% (95 % CI)	n	% (95 % CI)	n	% (95 % CI)	n	% (95 % CI)	n	% (95 % CI)				
Agente parasitario																
<i>Ascaridia galli</i>	7	3 43	3	43 (39.2 – 46.6)	0	0	-	1 14.3	3 43	3	43 (39.2 – 46.6)	0	0.0	-		
<i>Heterakis gallinarum</i>	4	2 50	2	50 (45.1 – 54.9)	1	25	(20.1 – 29.9)	0	0.0	-	1 25	25 (20.1 – 29.9)	0	0.0	-	
<i>Capillaria spp.</i>	2	1 50	1	50 (43.1 – 56.9)	0	0	-	0	0.0	-	1 50	50 (43.1 – 56.9)	0	0.0	-	
<i>Eimeria spp.</i>	17	5 29	5	29 (27 – 31.8)	3	18	(15.2 – 20)	2	11.8	(9.42 – 14.2)	6	35	35 (32.9 – 37.7)	1	5.9	(3.52 – 8.28)
Infecciones mixtas																
Un parásito	16	6 38	6	38 (35 – 40)	1	6	(3.8 – 8.7)	1	6.3	(3.8 – 8.7)	7	44	44 (41.4 – 46.4)	1	6.3	(3.8 – 8.7)
Dos parásitos	7	3 43	3	43 (39.2 – 46.6)	1	14	(10.6 – 18)	1	14.3	(10.6 – 18)	2	29	29 (24.9 – 32.3)	0	0.0	-
Tipos de infecciones mixtas																
<i>Ascaridia galli</i> + <i>Capillaria spp.</i>	1	1 100	1	100 (90.2 – 100)	0	0	-	0	0	-	0	0	-	0	0	-
<i>Heterakis</i> + <i>Eimeria</i>	3	2 67	2	67 (61 – 72.4)	1	33	(27.6 – 39)	0	0	-	0	0	-	0	0	-
<i>Capillaria</i> + <i>Eimeria</i>	1	0 0	0	0	-	0	-	0	0	-	1 100	100 (90.2 – 100)	0	0	-	
<i>Ascaridia galli</i> + <i>Eimeria</i>	2	0 0	0	0	-	0	-	1 50	50 (43.1 – 56.9)	1	50	50 (43.1 – 56.9)	0	0	-	

Con respecto a la intensidad de infestación, las aves presentaron valores promedio de 271 (± 74) huevos por gramo de heces (HPG) de *A. galli*; 275 (± 98) HPG de *H. gallinarum*; 125 (± 25) HPG de *Capillaria sp.* y de 236 (± 139) oocistos por gramo (OPG) de *Eimeria spp.* Las cinco especies hospedadoras presentaron un nivel de infestación de leve (<200 HPG) a moderada (>200-800 HPG/OPG). Para *Eimeria spp.*, el Pato rojizo andino obtuvo el mayor número de oocistos (600 OPG). Por el contrario, observamos que la parasitosis producida por *A. galli* fue moderada en la Focha andina (600 HPG), leve para el Pato rojizo andino (150 HPG) y el Cormorán neotropical (200 HPG). *H. gallinarum* tuvo infestación moderada en la Gallineta común (400 HPG), mientras que, en la Focha andina y en el Cormorán neotropical, la parasitosis fue leve (200 HPG). *Capillaria sp.* se presentó en dos especies con infestación leve: Cormorán neotropical (100 HPG) y Focha andina (150 HPG) (Tabla 3).

Tabla 3. Intensidad de infestación (HPG/OPG) de parásitos gastrointestinales en cinco especies de aves silvestres en la laguna de Yahuarcocha.

Agente parasitario	Total Ind.	<i>Phalacrocorax b.</i>		<i>Gallinula chl</i>		<i>Oxiura J.</i>		<i>Fulica A.</i>	
		n	HPG/OPG	n	HPG/OPG	n	HPG/OPG	n	HPG/OPG
<i>Ascaridia galli</i>	7	1	150	0	-	1	200	1	100
		1	150	-	-	-	-	1	600
		1	200	-	-	-	-	1	500
<i>Heterakis gallinarum</i>	4	2	150	1	400	0	0	1	200
			200	-	-	-	-	-	-
<i>Capillaria spp.</i>	2	1	150	0	-	0	0	1	100
<i>Eimeria spp.</i>	19	1	100	1	100	1	100	12	150
		1	400	-	-	-	-	-	-
			-	-	-	1	300	-	-
		1	300	2	250	1	200	2	200
		3	400	3	300	3	300	3	300
	4	500	-	-	4	600	-	-	

DISCUSIÓN

En este estudio se identificaron cuatro géneros de parásitos en cinco especies de aves silvestres. Géneros de parásitos como *A. galli* y *H. gallinarum* han sido descritas en estudios previos en aves de la especie *F. ardesiaca* [32]; adicionalmente, se conoce que en la zona de los trópicos los parásitos de este género, así como otros del género *Capillaria* sp. son diagnosticados con mucha frecuencia en aves de la familia gallinácea [33,34]. Por el contrario, parásitos del género *Eimeria* spp. pueden presentar una amplia diversificación según el hospedador, ya sean estas: aves silvestres de ambientes acuáticos, como el Cormorán de doble cresta (*Phalacrocorax auritus*) hospedador de *Eimeria auritusi*; aves terrestres como el Gallipavo (*Meleagris gallopavo silvestris*) hospedador de *E. gallopavonis* [35,36]; o aves de producción donde puede encontrarse al menos siete especies del género *Eimeria* spp. [37,38].

Nuestros resultados muestran que el género *Eimeria* spp. fue el parásito con mayor prevalencia dentro de las cinco especies hospedadoras, con un rango de variación desde el 20 % hasta el 60% de prevalencia. Un valor de prevalencia mayor (96 %) ha sido determinado en aves silvestres en sistemas de cautiverio [39]. Este hallazgo puede considerarse esperado, considerando que el género *Eimeria* es muy diverso entre localidades, formas de producción [40] y hospedadores. Por ejemplo, se han citado algunos géneros que son capaces de producir coccidiosis en aves comerciales; entre ellas: *Eimeria brunetti*, *Eimeria necatrix* y *Eimeria tenella* [41]. Adicionalmente, se ha determinado coccidiosis severa y moderada en la Grulla trompetera (*Grus americana*) producida por *Eimeria gruis* y *Eimeria reichenowi* [42] y una posible mortalidad en Cormoranes de doble cresta producido por *Eimeria auritusi* [43].

Por otro lado, observamos que las especies *A. galli*, *H. gallinarum* y el género *Capillaria* spp. afectaron en menor proporción a los hospedadores estudiados, estando ausentes



en algunos de ellos; las especies de este género de parásito afecta tanto a aves de hábitos acuáticos (*Podiceps major*) como a aves terrestres (*Columbia livia*) [44,45].

La presencia de las especies del género *Capillaria* spp. descritos en el presente estudio tiene concordancia con los resultados de los estudios realizados por Padilla-Aguilar *et al.* en aves acuáticas, que incluyen dos géneros de hospedador de este estudio (*Fulica americana* y *Oxyura jamaicensis*) [46]. Sin embargo, a nivel de diversidad de parásitos, nuestros hallazgos contrastan con el estudio en mención, ya que no identificamos otras familias parasitarias como la Tremátoda y Acantocephala [46].

Si bien es cierto que este estudio muestra una estimación de la carga parasitaria en los hospedadores, es necesario aclarar las limitaciones de las técnicas utilizadas; principalmente para la identificación y el conteo por el método de McMaster, ya que, autores como Sabatini, *et al.* y Paras, *et al.* [34,47], manifiestan que esta puede ser reemplazada por el método de Wisconsin o el método de Mini-FLOTAC que incrementan la probabilidad de un mayor conteo de HPG u OPG.

Entender la dinámica parasitaria de las aves acuáticas involucra otros factores tales como: los hábitos alimenticios, los movimientos de las aves, las interacciones interespecíficas, y los factores de hábitat tal que la calidad de agua y la producción del ecosistema [48]; variables no analizadas en este estudio y que proporcionarían nuevas rutas para explicar el estado y la salud de las especies aviares y su hábitat.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Héctor Cadena por la revisión al manuscrito. A la Dirección de Investigación de la Universidad Central por el financiamiento (Proyecto DGI 42). Al Ministerio del Ambiente por los permisos de investigación de la provincia de Imbabura No. 11-2016-1898-IC-FAU-FLO-DPAI/MAE). A la estación de bomberos de Yahuarcocha por el apoyo logístico en terreno. A Dana Luzuriaga y Edwin Reyes por la asistencia durante el trabajo de campo.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

N. Luzuriaga gestionó la adquisición de los fondos, la investigación, la conceptualización y la escritura del primer original; F. Pazmiño realizó la revisión y análisis estadístico; I. Flores, K. Mena y N. Reyes realizaron la metodología, el análisis de muestras y la revisión de resultados; L. Cedeño realizó la revisión del contenido y el trabajo en campo; A. Luzuriaga-Neira realizó la revisión del contenido teórico y colaboró en los trabajos de muestreo.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran no tener conflictos de interés sobre esta investigación.

REFERENCIAS

- [1] Amundson, C.L., Traub, N.J., Smith-Herron, A.J. y Flint, P.L. (2016). Helminth community structure in two species of arctic-breeding waterfowl. *International Journal for Parasitology: Parasites and Wildlife*, 5(3), 263–72. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijppaw.2016.09.002>
- [2] Poulin, R. (1999). The functional importance of parasites in animal communities: Many roles at many levels? *International Journal for Parasitology*, 29(6), 903–14. doi: [https://doi.org/10.1016/S0020-7519\(99\)00045-4](https://doi.org/10.1016/S0020-7519(99)00045-4)
- [3] Cross, J.H. (1992). Intestinal Capillariasis. *American Society for Microbiology*, 5(2), 120–9. <https://journals.asm.org/doi/10.1128/CMR.5.2.120>
- [4] Bajer, A., Alsarraf, M., Dwuznik, D., Mierzejewska, E.J., Kołodziej-Sobocińska, M. y Behnke, J.M. (2020). Rodents as intermediate hosts of cestode parasites of mammalian carnivores and birds of prey in Poland, with the first data on the life-cycle of *Mesocestoides melesi*. *Parasites and Vectors*, 13(1), 1–10. doi: <https://doi.org/10.1186/s13071-020-3961-2>
- [5] Valtonen, E.T., Holmes, J.C. y Koskivaara, M. (2011). Eutrophication, pollution, and fragmentation: Effects on parasite communities in roach (*Rutilus rutilus*) and perch (*Perca fluviatilis*) in four lakes in central Finland. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 54, 572–85. http://www.nrc.ca/cgi-bin/cisti/journals/rp/rp2_abst_e?cjas_f96-306_54_ns_nf_cjas54-97
- [6] Mercado-Reyes, M., Angulo-Casillo, S.A., Clemente-Sánchez, F., Hernández-Llamas, A., Gonzáles-Rojas, I., López-Torres, E. y Tavizón-García, P. (2010). Presence of Helminths in the Mexican Duck (*Anas platyrhynchos diazi*) of the Zacatecano Plateau, México. *Agrociencia*. 44(8), 931–9. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952010000800006
- [7] Salgado-Maldonado, G., Caspeta-Mandujano, J. M., Martínez-Ramírez, E., Montoya-Mendoza, J. y Mendoza-Franco, E. F. (2020). Diversity of helminth parasites of freshwater fish in the headwaters of the Coatzacoalcos River, in Oaxaca, Mexico. *International Journal for Parasitology: Parasites and Wildlife*, 12(5), 142–149. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijppaw.2020.05.008>
- [8] Leiva, N., George-Nascimento, M. y Muñoz, G. (2015). Carga parasitaria en crustáceos decápodos de la costa central de Chile: ¿existe alguna asociación con la abundancia de los hospedadores definitivos? *Latin american journal of aquatic research*, 43(4), 726–738. doi: <https://doi.org/10.3856/vol43-issue4-fulltext-11>
- [9] Rubio-Godoy, M., de León, G.P.P., Mendoza-Garfias, B., Carmona-Isunza, M.C., De la Mora, A.N. y Drummond, H. (2011). Helminth Parasites of the Blue-Footed Booby on Isla Isabel, México. *Journal of Parasitology*, 97(4), 636–41. doi: <http://dx.doi.org/10.1645/GE-2675.1>
- [10] Santoro, M., D'Alessio, N., Di Prisco, F., Veneziano, V., Galiero, G., Cerrone, A., Barca, L., Kinsella, J. y Aznar, F.J. (2016). Helminth communities of herons (Aves: Ardeidae) in southern Italy. *Parasitology International*, 65(4), 340–6. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.parint.2016.04.002>
- [11] Drago, F. B., Núñez, V. y Díaz, M. D. (2020). Checklist of the nematode parasites of wild birds of Argentina. *Revue Suisse de Zoologie*, 127(1), 43. doi: <https://doi.org/10.35929/RSZ.0005>
- [12] Hinojosa-Sáez, A. y González-Acuña, D. (2005). Estado actual del conocimiento de helmintos en aves silvestres de Chile. *Gayana (Concepción)*, 69(2), 241–253. doi: <https://doi.org/10.4067/s0717-65382005000200004>
- [13] Ortega-Olivares, M.P., Barrera-Guzmán, A.O., Haasová, I., Salgado-Maldonado, G., Guillén-Hernández, S. y Scholz, T. (2008). Tapeworms (Cestoda: Gryporhynchidae) of Fish-Eating Birds (Ciconiiformes) from Mexico: New Host and Geographical Records. *Comparative Parasitology*, 75(2), 182–95. doi: <https://doi.org/10.1654/4346.1>
- [14] Ribeiro Machado, A.C., Lima, O.M. y de Barros Araújo, J.L. (2007). Helmintos Parasitosem Aves Anseriformesque Ocorrem Em Goiás. *Revista de Patologia Tropical*, 35(3), 185–198. doi: <https://doi.org/10.5216/rpt.v35i3.1879>
- [15] Ensuncho Hoyos, C., Herrera Benavides, Y., Montalvo Puente, A., Almanza Palencia, M., Vergara Álvarez, J., Pardo-Rada, L. y Gómez Mercado, L. (2015). Frecuencia de parásitos gastrointestinales en gallinas criollas (*Gallus domesticus*) en el departamento de Córdoba, Colombia. *Revista Electronica de Veterinaria*, 16(6). <http://www.veterinaria.org/revistas/redvet/n060615.html>

- [16] Ensuncho Hoyos, C.F., Herrera Benavides, Y.M. y Vergara Garay, Ó.D. (2016). Primer registro de *Typhlocoelum cucumerinum* (Trematoda: Typhlocelidae) en *Cairina moschata domestica* (aves: Anatidae) en Colombia. *Revista de Medicina Veterinaria*, 33(33), 35–41. <https://www.semanticscholar.org/paper/Primer-registro-de-Typhlocoelum-cucumerinum-en-en-Hoyos-Benavides/98627448f0fc6aa10eb64771159295183deee7a>
- [17] Carrera-Játiva, P.D., Rodríguez-Hidalgo, R., Sevilla, C., y Jiménez-Uzcátegui, G. (2014). Gastrointestinal parasites in the Galápagos Penguin *Spheniscus mendiculus* and the flightless cormorant *Phalacrocorax Harrisii* in the Galápagos Islands. *Marine Ornithology*, 42(1), 77–80.
- [18] Jiménez-Uzcátegui, G., Sarzosa, M.S., Encalada, E., Rodríguez-Hidalgo, R., Celi-Erazo, M. y Huyvaert, K.P. (2015). Gastrointestinal parasites in the waved albatross (*Phoebastria irrorata*) of galápagos. *Journal of Wildlife Diseases*, 51(3), 784–786. doi: <https://doi.org/10.7589/2014-06-165>
- [19] Pardo-Lalva, A.F., Mendoza-León, C. y Carrera-Játiva, P.D. (2021). Endoparasites in the Synanthropic Feral Pigeon (*Columba livia* Domestic) in Southern Ecuador. *Journal of Zoo and Wildlife Medicine*, 52(3), 1003–8. doi: <https://doi.org/10.1638/2020-0233>
- [20] Guevara, E.A., Santander G., T., Espinosa, R. y Graham, C.H. (2021). Aquatic bird communities in Andean lakes of Ecuador are increasingly dissimilar over time. *Ecological Indicators*, 121, 107044. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107044>
- [21] Guevara, E.A., Santander, T. y Duivenvoorden, J.F. (2012). Seasonal Patterns in Aquatic Bird Counts at Five Andean Lakes of Ecuador. *Waterbirds*, 35(4), 636–41. <http://www.bioone.org/doi/abs/10.1675/063.035.0413>
- [22] Van Colen, W., Portilla, K., Oña, T., Wyseure, G., Goethals, P., Velarde, E. y Muylaert, K. (2017). Limnology of the neotropical high elevation shallow lake Yahuarcocha (Ecuador) and challenges for managing eutrophication using biomanipulation. *Limnologia*, 67, 37–44. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.limno.2017.07.008>
- [23] Jácome, G., Valarezo, C. y Yoo, C. (2018). Assessment of water quality monitoring for the optimal sensor placement in lake Yahuarcocha using pattern recognition techniques and geographical information systems. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190(4), 259. doi: <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6639-x>
- [24] Saelens, P. (2015). *Ecological functioning of a eutrophic, high-altitude shallow lake in Ecuador, Laguna Yahuarcocha*. KU Leuven Kulak. <https://scriptiebank.be/scriptie/2015/ecological-functioning-eutrophic-high-altitude-shallow-lake-ecuador-laguna>
- [25] Maridueña, A., Chalén, D., Coello, J., Elías, E., Solís-Coello, P., and Aguilar, F. (2011). Mortandad de peces en la laguna de Yahuarcocha, cantón Ibarra, provincia de Imbabura. *Boletín Especial*, 2(1), 128. <https://aquadocs.org/handle/1834/4501>
- [26] Terneus, E. (2014). Vegetación acuática y estado trófico de las lagunas andinas de San Pablo y Yahuarcocha, provincia de Imbabura, Ecuador. *Revista Ecuatoriana De Medicina Y Ciencias Biológicas*, 2, 121–31. doi: <https://doi.org/10.26807/remcb.v35i1-2.255>
- [27] Benavides, C. (2021). *Evaluación de la diversidad ictiológica del lago Yahuarcocha, provincia de Imbabura*. Repositorio digital Universidad Técnica del Norte. <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/11753>
- [28] Benítez-López, A., Mougeot, F., Martín, C.A., Casas, F., Calero-Riestra, M., García, J. y Viñuela, J. (2011). An improved night-lighting technique for the selective capture of sandgrouse and other steppe birds. *European Journal of Wildlife Research*, 57(2), 389–93. doi: <https://doi.org/10.1007/s10344-010-0437-2>
- [29] Bowman, D. (2010). *Georgi. Parasitología para veterinarios*. Elsevier Health Sciences. https://books.google.com.ec/books/about/Georgi_Parasitolog%C3%ADa_para_veterinarios.html?id=vddwEAAAQBAJ&redir_esc=y <https://inspectioncopy.elsevier.com/book/details/9788413822501>
- [30] Thienpont, D., Rochette, F. y Vanparijs, O.F.J. (1979). *Diagnóstico de las helmintiasis por medio del examen coprológico*. Janssen Research Foundation. <https://search.worldcat.org/es/title/diagnostico-de-las-helmintiasis-por-medio-del-examen-coprologico/oclc/1024602266>
- [31] Zajac, A. y Conboy, G. (2012). Fecal Examination for the Diagnosis of Parasitism. In Gary A. C. (Ed.), *Veterinary Clinical Parasitology* (pp. 3–164). Wiley-Blackwell. www.wiley.com/go/zajac
- [32] Cruz, G. (2016). *Estudio comparativo de ecto y endoparásitos en Gallus gallus y Fulica ardesiaca, en la Laguna Cola, Riobamaba*. Universidad Central del Ecuador.

- [33] Organización Mundial de la Salud. (1992). *Métodos básicos de laboratorio en parasitología médica*. Organización Mundial de la Salud. <https://iris.who.int/handle/10665/38858>
- [34] Sabatini, G. A., de Almeida Borges, F., Claerebout, E., Gianechini, L. S., Höglund, J., Kaplan, R. M., Lopes, W. D. Z., Mitchell, S., Rinaldi, L., von Samson-Himmelstjerna, G., Steffan, P. y Woodgate, R. (2023). Practical guide to the diagnostics of ruminant gastrointestinal nematodes, liver fluke and lungworm infection: interpretation and usability of results. *Parasites and Vectors*, 16(1), 58. doi: <https://doi.org/10.1186/s13071-023-05680-w>
- [35] Cervantes-Rivera, K., Villagómez-Cortés, J.A., Arroyo-Lara, A. y Landín-Grandvallet, L.A. (2016). A diagnostic survey of gastroenteric helminths in backyard poultry of a rural village in Mexican tropics. *ARPN Journal of Agricultural and Biological Science*, 11(12), 463–470. https://www.arpnjournals.com/jabs/volume_12_2016.htm
- [36] Macdonald, A.M., Jardine, C.M., Rejman, E., Barta, J.R., Bowman, J. y Nemeth, N.M. (2019). High prevalence of Mycoplasma and Eimeria species in free-ranging eastern wild turkeys (*Meleagris gallopavo silvestris*) in Ontario, Canada. *Journal of Wildlife Diseases*, 55(1), 54–63. doi: <https://doi.org/10.7589/2017-11-273>
- [37] López-Osorio, S., Chaparro-Gutiérrez, J.J. y Gómez-Osorio, L.M. (2020). Overview of Poultry Eimeria Life Cycle and Host-Parasite Interactions. *Frontiers in Veterinary Science*, 7, 1–8. doi: <https://doi.org/10.3389/fvets.2020.00384>
- [38] Rotolo, J.L., Snyder, R.P., Imai, R.K., Répérant, J.M. y Barta, J.R. (2021). Description of a New Eimeria Species (Apicomplexa: Eimeriidae) Responsible for Clinical Coccidiosis in Commercial Chukar Partridge (*Alectoris chukar*). *Journal of Parasitology*, 107(4), 648–57. doi: <https://doi.org/10.1645/21-17>
- [39] Corredor, D.J.G., Parada, O.J.S., Medellín, M.O.P. y Becerra, R.J.A. (2013). Identificación de parásitos gastrointestinales en aves silvestres en cautiverio. *Revista Científica de la Facultad de Ciencias Veterinarias de la Universidad del Zulia*, 23(3), 254-258. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=95926665004>
- [40] Chengat Prakashbabu, B., Thenmozhi, V., Limon, G., Kundu, K., Kumar, S. y Blake, D.P. (2017). Eimeria species occurrence varies between geographic regions and poultry production systems and may influence parasite genetic diversity. *Veterinary Parasitology*, 233, 62–72. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304401716305040>
- [41] Mesa, C., Gómez-Osorio, L.M., López-Osorio, S., Williams, S.M. y Chaparro-Gutiérrez, J.J. (2021). Survey of coccidia on commercial broiler farms in Colombia: frequency of Eimeria species, anticoccidial sensitivity, and histopathology. *Poultry Science*, 100(8), 101239. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S003257912100273X>
- [42] Bertram, M.R., Hamer, G.L., Snowden, K.F., Hartup, B.K. y Hamer, S.A. (2015). Coccidian Parasites and Conservation Implications for the Endangered Whooping Crane (*Grus americana*). *PLoS ONE*, 10(6), e0127679. doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0127679>
- [43] Yabsley, M.J. y Gibbs, S.E.J. (2006). Description and phylogeny of a new species of Eimeria from Double-crested Cormorants (*Phalacrocorax auritus*). *Journal of Parasitology*, 92(2), 385–8. doi: <https://doi.org/10.1645/GE-592R.1>
- [44] Pérez-García, J., Monsalve-Arcila, D. y Márquez-Villegas, C. (2015). Presencia de parásitos y enterobacterias en palomas ferales (*Columba livia*) en áreas urbanas en Envigado, Colombia. *Revista Facultad Nacional de Salud Pública*, 33(3), 370–376. doi: <https://doi.org/10.17533/udea.rfnsp.v33n3a06>
- [45] Martínez-Haro, M., Sánchez-Nava, P., Salgado-Maldonado, G., and Rodríguez-Romero, F. de J. (2012). Helmintos gastrointestinales en aves acuáticas de la subcuenca alta del río Lerma, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 83(1), 36–41. <http://www.ibiologia.unam.mx>
- [46] Padilla-Aguilar, P., Romero-Callejas, E., Osorio-Sarabia, D., Pérez-Ponce De León, G. y Alcalá-Canto, Y. (2020). New records of helminth parasites of nine species of waterfowl in Mexico, and a checklist of the helminth fauna of Anatidae occurring in Mexican wetlands. *Journal of Helminthology*, 93, 1–15. doi: <https://doi.org/10.1017/S0022149X20000577>
- [47] Paras, K., George, M., Vidyashankar, A. y Kaplan, R. M. (2018). Comparison of fecal egg counting methods in four livestock species. *Veterinary Parasitology*, 257, 21–27. doi: <https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2018.05.015>
- [48] Laurance, S. G. W., Jones, D., Westcott, D., Mckeown, A., Harrington, G. y Hilbert, D. W. (2013). Habitat Fragmentation and Ecological Traits Influence the Prevalence of Avian Blood Parasites in a Tropical Rainforest Landscape. *PLoS ONE*, 8(10), e76227. doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0076227>

Efecto del sistema de siembra en acolchado plástico sobre el comportamiento agronómico y rentabilidad de cuatro variedades de maíz en la Sierra del Ecuador

Carlos A. Sangoquiza-Caiza^{1*}, José L. Zambrano-Mendoza¹, Cristian R. Subía-García¹, Victoria López-Guerrero¹, Marcelo Racines-Jaramillo¹, Ana Pincay-Verdezoto², Chang Hwan Park²

¹Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias INIAP- Estación Experimental Santa Catalia, Programa de Maíz. Cutuglagua, Km 1½, Mejía, Pichincha, Ecuador

² Korea Partnership for Innovation of Agriculture (KOPIA). Cutuglagua, Mejía, Ecuador

*Autor para correspondencia: carlos.sangoquiza@iniap.gob.ec

Effect of the plastic mulch planting system on the agronomic behavior and profitability of four varieties of corn in the Sierra del Ecuador

Abstract

In the Andean region of Ecuador, the predominant agricultural sector is largely managed by small-scale farmers who lack access to modern technologies. Consequently, their crop yields remain low, rendering their production systems vulnerable to various factors such as drought, cold weather, and labor shortages caused by significant migration. Introducing plastic mulching in agriculture offers a promising solution to enhance yields by optimizing water and nutrient utilization, accelerating harvests, and improving product quality. Moreover, it reduces the labor burden, which is increasingly scarce and costly in rural areas. This study aimed to assess the impact of plastic mulch on the agronomic performance and profitability of four different open pollinated varieties of maize: INIAP-101 (floury white), INIAP-122 (floury yellow), INIAP-193 (floury black), and INIAP-199 (*chulpi*-sweet). Four independent experiments were conducted using a randomized block design with three replications at two locations within the region. Two treatments were compared: (T1) plastic mulching and (T2) conventional management (without mulching). The results revealed significant improvements in plant height, increasing from 1.55 to 2.01 m, and a remarkable 85 % boost in average maize yield under the mulching system, rising from 2.91 t ha⁻¹ to 4.95 t ha⁻¹ compared to conventional management (T2). However, the benefit-to-cost ratio (B/C) was higher for the mulched system (2.55) compared to the conventional system (2.14). The unit production cost was also lower in the mulched system, averaging at 0.67 USD per kilogram, in contrast to the conventional system's average of 0.77 USD per kilogram. These findings suggest that adopting plastic mulch for planting and cultivation could offer a sustainable means to intensify maize production in the Andean region while enhancing producers' incomes.

Keywords: plastic mulching, maize, yield, technology, innovation.



Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /
Edited by:
María Gabriela Albán

Recibido /
Received:
11/04/2024

Aceptado /
Accepted:
03/06/2024

Publicado en línea /
Published online:
21/08/2024



Resumen

En la región Andina del Ecuador la mayor superficie destinada a la agricultura está en manos de pequeños agricultores que no tienen acceso a tecnologías. Como resultado de ello se visibiliza el bajo rendimiento de sus cultivos, aumentando la vulnerabilidad de sus sistemas productivos por otros factores como: la sequía, las bajas temperaturas y la falta de mano de obra por la elevada migración. El uso de acolchado plástico en la agricultura es una tecnología que permite aumentar los rendimientos a través del empleo eficiente del agua, el aprovechamiento de los nutrientes, el adelanto de las cosechas y la calidad del producto; además que permite un ahorro significativo de mano de obra, que cada vez es más escaso y costoso en el campo. El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto del sistema de siembra en acolchado plástico sobre el comportamiento agronómico y la rentabilidad de cuatro variedades de maíz de diferentes tipos de grano: INIAP-101 (blanco harinoso), INIAP-122 (amarillo harinoso), INIAP-193 (negro harinoso) e INIAP-199 (chulpi-dulce). Para el efecto, se establecieron cuatro experimentos independientes con un diseño experimental de bloques completamente al azar, con tres repeticiones en dos provincias de la Sierra del Ecuador. Se evaluaron dos tratamientos: (T1), acolchado plástico y (T2), manejo convencional (sin acolchado). El sistema de acolchado plástico incrementó significativamente ($p < 0,01$) la altura de planta y el rendimiento, pasando de un promedio de 1,55 a 2,01 m de altura y de 2,91 t ha⁻¹ a 4,95 t ha⁻¹ de grano, respectivamente. El incremento promedio del rendimiento de grano en los cuatro ensayos fue del 85 % respecto al del manejo convencional. La relación B/C promedio fue de 2,14 para el sistema convencional y de 2,55 para el sistema con acolchado. El costo unitario de producción por kilo de grano producido fue más bajo en el sistema con acolchado, con un promedio de 0,67 USD kg⁻¹, en comparación con el sistema convencional, que tuvo un promedio de 0,77 USD kg⁻¹. Los resultados obtenidos permiten concluir que el cultivo con acolchado plástico puede ser una alternativa para intensificar de manera sostenible la producción de maíz en la región Andina y mejorar los ingresos de los productores.

Palabras clave: acolchado plástico, variedades, rendimiento, tecnología, innovación.

INTRODUCCIÓN

El Instituto Nacional de Estadísticas y Censos para el 2022 reportó que la superficie sembrada de maíz suave (*Zea mays* L. var. *amylacea*) en el Ecuador fue de 57 309 ha, con rendimientos promedio de 1,07 t ha⁻¹ en grano en seco y 3,23 t ha⁻¹ en choclo [1]; que se encuentran entre los rendimientos más bajos de América Latina. El 98 % del maíz suave cultivado en el país se produce en la Sierra, lo que lo convierte en uno de los cultivos más importantes para los pequeños y medianos agricultores que ven afectados sus rendimientos debido a causas bióticas y abióticas presentes en diferentes etapas de desarrollo.

El Ecuador es considerado a nivel mundial como un país de amplia biodiversidad. Para el caso particular del maíz, en la Sierra se encuentra diversidad de colores, formas y tamaños que han permitido la identificación de 17 razas cultivadas [2]. Producto del aprovechamiento de la amplia base genética en trabajos de mejoramiento de



esta especie, se han liberado variedades adaptadas a las diferentes condiciones agroecológicas del Ecuador. Actualmente, se encuentran vigentes para la zona Andina alrededor de 10 variedades de maíz INIAP entre las que podemos mencionar maíz blanco, amarillo harinoso, chulpi y maíz morado, entre otros [3].

El impacto causado por los efectos del cambio climático, como la poca disponibilidad de agua a través del tiempo, está promoviendo cada día más el desarrollo de una agricultura protegida mediante el establecimiento de estrategias que permitan hacer un uso racional y eficiente de este recurso. El uso de acolchado que se refiere a cualquier manto de restos vegetales que se forman naturalmente o son aplicados a la superficie del suelo sin ser incorporados al mismo, así como a cualquier material sintético que se coloca sobre la superficie del suelo es una alternativa tecnológica para mejorar los rendimientos de manera más temprana [4,5].

Dentro de la plasticultura, el acolchado o *mulching* consiste en cubrir las camas o surcos de cultivos con películas plásticas. Su uso ha demostrado ser una tecnología que incrementa el rendimiento de los cultivos debido, entre otras cosas, a un uso eficiente del agua, siendo la agricultura el mayor demandante de este líquido vital al consumir alrededor del 70 % del agua dulce disponible en el mundo [6,7,8]. Esta tecnología se ha utilizado desde hace varios años en la agricultura, principalmente en las áreas de horticultura. El principal motivo de la implementación de los acolchados es ganar precocidad y mejorar la productividad del cultivo con la protección del sistema radicular del frío, de la sequía y del exceso de humedad [9,10]. También evita la presencia de malezas, incrementa la temperatura del suelo y disminuye la evaporación de agua del suelo [11,12].

Las películas plásticas o acolchados utilizados para recubrimientos agrícolas ocupan el segundo lugar en importancia, después de los invernaderos. En términos de volumen de plástico empleado a nivel mundial, la superficie cultivada con este tipo de recubrimiento alcanza las 4 530 000 hectáreas, siendo China el país que más usa esta tecnología con 2 000 000 hectáreas; seguido por Japón con 150 000 hectáreas, y Francia y España con 100 000 hectáreas cada uno. En América Latina esta aplicación ha experimentado un menor desarrollo, al ser México el país que más la utiliza con apenas 9 000 hectáreas [13].

Gracias a los beneficios que proporciona el uso del acolchado plástico, este ha sido utilizado de forma satisfactoria pues permite modificar el medio de crecimiento e incrementa el rendimiento y la calidad de los productos cosechados [14]. Sin embargo, son varios los factores que modifican la temperatura del perfil superior del suelo; entre ellos se encuentran la composición y el color de plástico utilizados de acuerdo con el cultivo y su manejo [15,16].

Sobre los costos y beneficios que representan el uso de acolchados en agricultura, se sabe que depende mucho del cultivo, de las condiciones ambientales donde se usa el acolchado, de la calidad de plástico, entre otras variables. De manera general, al obtener mayores rendimientos que mejoran los ingresos, se cubre el incremento de los costos que la tecnología representa, generando beneficios económicos para los productores de la región Andina [12,17].

Con estos antecedentes, el objetivo del estudio fue evaluar el comportamiento agronómico, productivo, la rentabilidad y el beneficio/costo de cuatro variedades

de maíz harinoso cultivado con cobertura plástica, en condiciones de clima y suelo característicos de la región alto Andina de la Sierra ecuatoriana.

MATERIALES Y MÉTODOS

La presente investigación se realizó entre los años 2019 y 2022 en los ciclos agrícolas tradicionales de siembra y cultivo de maíz entre octubre y junio, en las provincias de Pichincha y Cotopaxi (Figura 1).

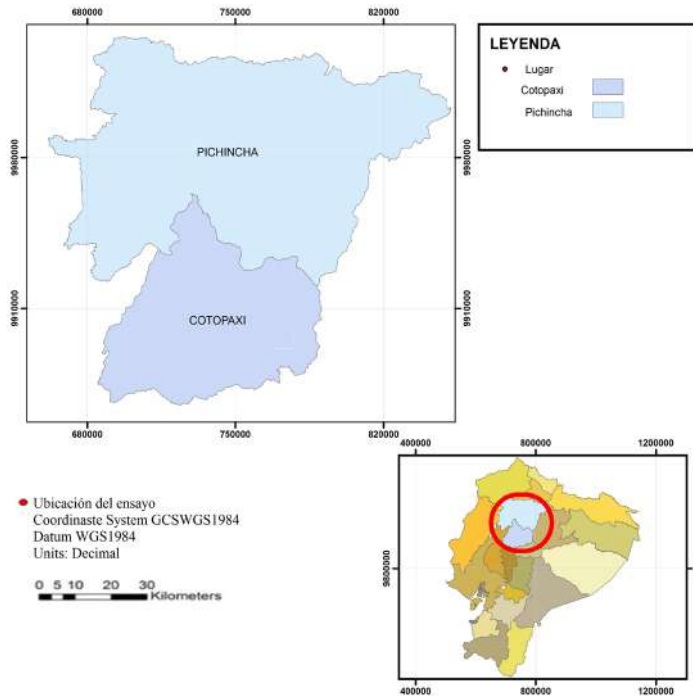


Figura 1. Mapa de ubicación de los ensayos de investigación en campo. Fuente: ArcGIS

El tipo de suelo en la provincia de Pichincha (Cutuglagua, EESC) presentó una textura franca con 9,70 % de materia orgánica y un pH ligeramente ácido de 5,17; a diferencia de la provincia de Cotopaxi (Guaytacama, Pilacoto), donde los suelos fueron de textura arenosa, con 4,80 % de materia orgánica y un pH alcalino de 7,87.

Se sembraron las variedades de maíz de libre polinización INIAP-101 [18], INIAP-122 [19], INIAP-193 [20] e INIAP-199 [21], que mejor se han adaptado a las condiciones ambientales de los lugares seleccionados (Tabla 1), y que se establecieron bajo dos tratamientos: (T1) con acolchado plástico y (T2) sin acolchado plástico o manejo convencional del agricultor. Los ensayos se establecieron bajo el Diseño de Bloques Completos al Azar (DBCA) con cuatro repeticiones en cada localidad.

Tabla 1. Variedades de maíz y localidades de implementación de los ensayos para evaluar el sistema de acolchado plástico en la producción de grano en la Sierra del Ecuador.

Variedad	Año de siembra	Provincia	Cantón	Parroquia	Latitud ¹	Longitud ¹	Altitud m.s.n.m ¹
INIAP-101 (Blanco harinoso)	2021	Pichincha	Mejía	Cutuglagua	-0.369381	78.562635	3 089
INIAP-122 (Amarillo harinoso)	2021	Pichincha	Mejía	Cutuglagua	-0.367171	78.554895	3 095
INIAP-193 (Chulpi)	2019	Cotopaxi	Latacunga	Guaytacama	-0.816071	78.654113	2 700
INIAP-199 (Negro harinoso)	2019	Cotopaxi	Latacunga	Guaytacama	-0.805452	78.654113	2 700

¹Datos tomados por GPS.

En el sistema de siembra bajo acolchado plástico, cada unidad experimental constó de tres camas de 10 m de largo por 1,2 m de ancho distanciadas a 0,4 m entre camas con un área total de 48 m². Se sembraron dos hileras por cama con una planta cada 0,25 m en la hilera por 0,6 m entre hileras. La parcela con el manejo convencional (sin plástico) estuvo formada por 6 surcos de 10 m de largo distanciados a 0,8 m con área total de 48 m² donde se sembraron entre 3 y 4 semillas cada 0,5 m. En el raleo del sistema de acolchado se dejó una planta por sitio y en el sistema convencional se dejaron 2 plantas por sitio equivalente a una población de 50 000 plantas por hectárea en ambos tratamientos (Figura 2).

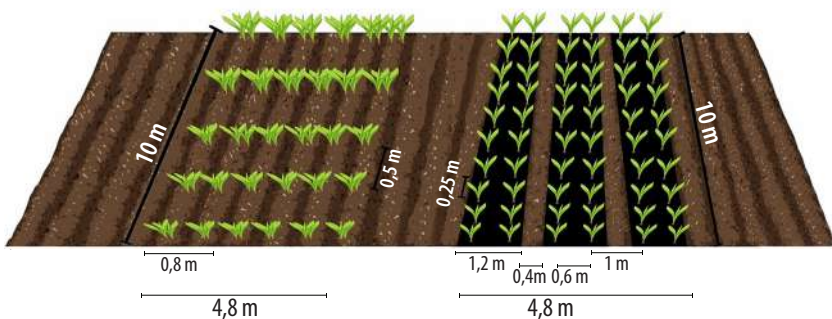


Figura 2. Distribución de las unidades experimentales de la evaluación de acolchado plástico en el cultivo de maíz.

La preparación del suelo se realizó con arado y rastra, se fertilizó de acuerdo a la recomendación para la siembra de maíz en la Sierra del Ecuador: 107 kg ha⁻¹ N fraccionado en dos aplicaciones a la siembra y a los 45 días, 45 kg ha⁻¹ P₂O₅, 86 kg ha⁻¹ K₂O, 11 kg ha⁻¹ MgO y 9 kg ha⁻¹ S [3]. El tipo de plástico utilizado en la investigación fue *mulch* negro (1,40 m de ancho, 45 micras, ReyFilm Black, REYENVAS S.A, Sevilla, España).



Se registraron datos de altura de planta (m) y rendimiento en grano seco ($t\ ha^{-1}$), siguiendo los protocolos establecidos por el CIMMYT para el manejo de ensayos de maíz [22]. Se realizó el análisis de varianza y Tukey al 5 % como prueba de comparación de medias empleando el paquete estadístico "INFostat" para Windows, versión 2020 [23]. Se realizó el análisis económico de presupuesto de producción con la metodología de costos fijos y variables [3]. Los costos fueron ajustados a una hectárea y se calcularon en dólares los siguientes indicadores financieros: costo total, beneficio bruto, beneficio neto, costo unitario de producción, rentabilidad simple (%) y la relación beneficio/costo (B/C).

RESULTADOS

El análisis estadístico para cada tipo de maíz demostró que el uso de acolchado plástico incrementó de manera significativa ($p < 0,01$) la altura de planta en las variedades de maíz INIAP-101, INIAP-122 e INIAP-199; no así en la variedad INIAP-193 que no presentó diferencias estadísticas. Para la variable rendimiento en grano seco $t\ ha^{-1}$ se observaron diferencias estadísticas altamente significativas ($p < 0,01$), incrementándose la producción en todas las variedades al usar acolchado plástico (Tabla 2).

Tabla 2. Altura de planta y rendimiento de cuatro variedades de maíz con el uso de acolchado plástico en la Sierra del Ecuador.

Variedad	Tratamiento	Altura de planta (m) *	Rendimiento ($t\ ha^{-1}$) *
INIAP-101	Plástico	2,48 a	7,75 a
	Convencional	1,65 b	4,65 b
	CV (%)	7,87	14,03
	Valor p	0,0004	0,0024
INIAP-122	Plástico	2,18 a	3,13 a
	Convencional	1,39 b	1,35 b
	CV (%)	12,69	19,46
	Valor p	0,0001	0,0012
INIAP-193	Plástico	1,98	4,88 a
	Convencional	1,97	2,40 b
	CV (%)	11,12	8,3
	Valor p	0,9261	0,0001
INIAP-199	Plástico	1,48 a	4,03 a
	Convencional	1,15 b	2,95 b
	CV (%)	9,79	9,2
	Valor p	0,011	0,0032

* Medias con una letra común no son significativamente diferentes según el análisis de Tukey ($p > 0,05$)

Para la variable rendimiento $t\ ha^{-1}$ bajo los sistemas de siembra (convencional y acolchado plástico), se muestra que el rendimiento promedio fue significativamente mayor en el sistema de siembra con acolchado $4,95\ t\ ha^{-1}$ en comparación con el sistema

convencional 2,91 t ha⁻¹. Así mismo para la variable altura de la planta se muestra un mayor crecimiento en el sistema de acolchado 2,01 m en comparación con el sistema convencional 1,55 m (Tabla 3).

Tabla 3. Promedios de altura de planta y rendimiento para sistemas de siembra de maíz en la Sierra del Ecuador.

Sistema	Altura de planta (m) *	Rendimiento (t ha ⁻¹) *
Plástico	2,01 a	4,95 a
Convencional	1,55 b	2,91 b
CV (%)	9,05	14,13
Valor p	0,0002	0,0001

* Medias con una letra común no son significativamente diferentes según el análisis de Tukey ($p > 0,01$)

En la Figura 3, se presenta el incremento porcentual del rendimiento en grano seco de cuatro variedades de maíz cultivadas en el sistema de acolchado plástico, observándose incrementos de: 67 % para la variedad INIAP-101, 132 % para INIAP-122, 103 % para INIAP-193 y 37 % para la variedad INIAP-199.

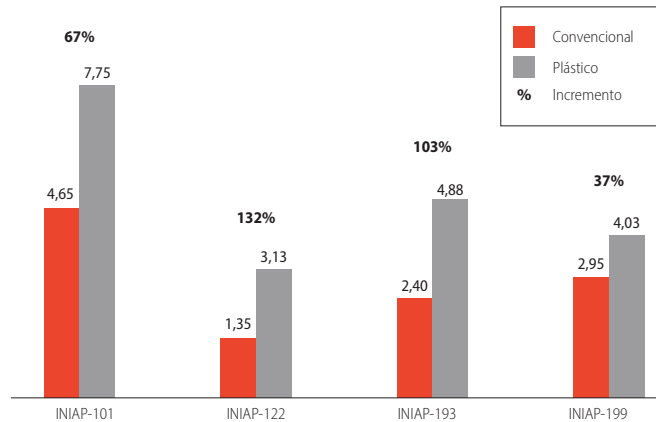


Figura 3. Rendimiento t ha⁻¹ de cuatro variedades de maíz con el uso de acolchado plástico y siembra convencional en la Sierra del Ecuador.

ANÁLISIS ECONÓMICO

En la Tabla 4 se presentan los costos de producción y los indicadores económicos de las cuatro variedades con los dos sistemas de siembra en estudio, donde se observa que el sistema convencional (control) reporta un costo promedio de 1835,21 USD ha⁻¹, mientras que en el sistema de acolchado plástico el costo promedio fue de 2618,59 USD ha⁻¹, lo que representa un 47,82 % de incremento en los costos totales.

Tabla 4. Costos de producción del sistema de siembra bajo acolchado plástico con cuatro variedades de maíz en la Sierra del Ecuador.

Variedad	INIAP-101		INIAP-122		INIAP-193		INIAP-199	
	Control	Acolchado	Control	Acolchado	Control	Acolchado	Control	Acolchado
Costos (USD ha⁻¹)								
Preparación suelo	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00
Siembra y fertilización	568,00	1168,00	568,00	1198,00	568,00	1198,00	568,00	1198,00
Labores culturales	473,00	413,00	473,00	413,00	473,00	413,00	473,00	413,00
Cosecha, poscosecha	374,40	482,00	174,00	351,30	190,10	437,90	185,20	425,30
Total costos variables	1565,40	2213,00	1365,00	2112,30	1381,10	2198,90	1376,20	2186,30
Total costos fijos	434,81	531,95	404,75	516,85	407,17	529,84	406,43	527,95
Costo total	2000,21	2744,95	1769,75	2629,15	1788,27	2728,74	1782,63	2714,25
Indicadores								
Ingreso bruto (USD ha ⁻¹)	5812,50	9687,50	2025,00	4695,00	3600,00	7320,00	4425,00	6045,00
Ingreso neto (USD ha ⁻¹)	3812,29	6942,55	255,25	2065,86	1811,74	4591,27	2642,37	3330,76
Relación beneficio/costo	2,91	3,53	1,14	1,79	2,01	2,68	2,48	2,23
Costo unitario (USD kg)	0,43	0,35	1,31	0,84	0,75	0,56	0,60	0,67
Diferencia % costo por kg de las tecnologías	- 19		- 36		- 25		12	
Tasa multiplicación (kg x 1)	155	258	45	104	80	163	98	134

El ingreso neto promedio bajo el sistema de acolchado plástico fue 4 283 USD ha⁻¹ mientras que en el tratamiento control (sistema convencional) fue 2130 USD ha⁻¹. La rentabilidad simple fue positiva en todos los casos. En cuanto a la relación B/C promedio, en el sistema de control fue de 2,14 mientras que en el sistema con acolchado fue de 2,55. El costo unitario promedio de producción por kilogramo fue de 0,77 USD en el sistema de control y de 0,67 USD en el sistema de acolchado. Esto se debe al mayor rendimiento obtenido con el acolchado, que en promedio fue de 164,92 kg, en comparación con los 94,58 kg del sistema de control.

DISCUSIÓN

El sistema de siembra en acolchado permitió un mayor crecimiento de las plantas en las variedades de maíz, con excepción de la variedad INIAP-193, que no mostró diferencias significativas en altura de planta, lo que posiblemente se debe a la capacidad que tiene el acolchado plástico de crear un microclima favorable en el suelo al retener la humedad y acumular calor de acuerdo a las condiciones ambientales existentes el momento del cultivo, lo que estimula el crecimiento de las plantas. Resultados similares fueron obtenidos por Velásquez et al. [24], al cultivar ají con acolchado plástico y películas fotoselectivas; las variables agronómicas mostraron que los tratamientos con acolchado fueron significativamente superiores. Además, la cosecha se aceleró en 21 días en comparación con los tratamientos sin acolchado.

Para la variable de rendimiento en grano seco $t\ ha^{-1}$, se observó un incremento significativo en todas las variedades cultivadas con acolchado. El incremento promedio de rendimiento fue del 85%, lo que demuestra que esta tecnología agrícola es eficaz para mejorar la producción y tiene el potencial de duplicar la productividad del maíz en la Sierra del Ecuador. Este aumento puede atribuirse a una mayor eficiencia en el uso de los nutrientes, los cuales son mejor captados y asimilados por las plantas bajo el sistema de acolchado.

Estudios realizados por Wang et al. [25], corroboran los efectos positivos de este sistema en el cultivo de maíz (*Zea mays* L.), demostrando que la presencia de nitratos en el suelo, así como la absorción de nitrógeno por las plantas crecidas en suelos con acolchado plástico es mayor que en plantas crecidas en suelos sin acolchar. Esto hace que las plantas incrementen la absorción y distribución de nitratos y, por ende, presenten mayor desarrollo y producción en los cultivos.

En otras investigaciones sobre el uso de acolchado plástico para la producción de maíz forrajero se observaron plantas más altas en los sistemas de acolchado con respecto a las plantas sin acolchar. En cuanto a los valores del peso de mazorca se evidenció que el acolchado plástico mejora las características del maíz y se encontró un incremento en producción del 8 % al 17 % [26]. El estudio en maíz realizado por Taday et al. [27] reportó diferencias significativas en altura de planta con incrementos de entre 8,5 a 9,5 cm del sistema de acolchado plástico respecto del testigo, mientras el diámetro de tallo aumentó 0,18 cm. Al analizar las variables de producción, se encontró un mayor desarrollo en la longitud, diámetro y peso de la mazorca, resultados que concuerdan con los reportados por López et al. en estudios similares [17]. Estos resultados destacan la importancia del acolchado plástico como una tecnología que puede mejorar tanto el crecimiento de las plantas como los rendimientos del cultivo de maíz, lo que sugiere su utilidad en prácticas agrícolas destinadas a aumentar la productividad y la eficiencia de los cultivos.

Dentro del análisis económico se observa que existen diferencias en los costos de producción entre los tratamientos evaluados, lo que se debe al incremento en el rendimiento y reducción de actividades de manejo o utilización de insumos en las distintas labores del cultivo. En la siembra, los mayores costos están asociados con el sistema acolchado debido al uso del plástico y a la mano de obra necesaria para colocar la lámina plástica en el campo. Dentro de las labores de manejo del cultivo, se observa



que el costo del tratamiento testigo (convencional) es mayor debido al rascadillo, al aporque y a la fertilización complementaria que demandan un considerable uso de mano de obra, en contraste con el sistema de acolchado donde se reduce el costo, ya que solo se realiza un raleo y una fertilización complementaria. En la etapa de cosecha y poscosecha, los costos varían en función del rendimiento o volumen producido por cada variedad y sistema de siembra. En el sistema de acolchado, retirar el plástico del suelo genera un costo adicional debido a la necesidad de mano de obra para retirar este material del campo después de la cosecha.

Si bien el promedio del costo de producción total por hectárea es mayor en el sistema de cultivo con acolchado plástico respecto al sistema convencional, el ingreso neto, la rentabilidad simple y la relación beneficio/costo promedio son más altos en los sistemas con acolchado debido al significativo incremento de la producción reportada bajo este sistema. El costo unitario de producción también es más bajo en el sistema acolchado, lo que se atribuye a las mayores tasas de multiplicación. Estos resultados son consistentes con investigaciones anteriores realizadas por Zambrano et al. [12], López et al. [17] y Zhang et al. [28], donde señalan que el uso de acolchado plástico genera mayor beneficio económico, ya que la inversión del plástico fue superada por el ahorro en mano de obra de las labores culturales que la práctica convencional requiere. De la misma manera, Calderón et al. [29], en su estudio señaló que el tratamiento con acolchado plástico tuvo un costo total superior al tratamiento sin acolchado y al final coincide con Orozco et al. [30], producto de la experiencia en otros cultivos. Así, señalan que la inversión generada por la implementación del acolchado plástico es compensada con el incremento en la producción, generando una rápida recuperación de la inversión con este sistema de producción.

Nava [31] indica que el tratamiento con plástico puede reducir la mano de obra necesaria para el control de malezas hasta en un 72 % debido a que el plástico actúa como una barrera física que impide la germinación de las malezas, lo que reduce la necesidad de realizar labores de desmalezado manual. Resultados similares fueron reportados por Pat et al. [32], quienes manifestaron que los altos costos de la producción convencional corresponden a la mano de obra utilizada y al control de malezas, plagas y enfermedades, que representa el 50 % del total de los costos de producción. Se observó que en tres variedades se redujo el costo por kilogramo producido entre 19 % y 35 % con el uso de acolchado plástico, lo que no sucedió con el maíz negro debido a que la ganancia en el rendimiento no fue suficiente; razón por la que su comercialización debe ser orientada a obtener mayores ganancias con productos procesados como la harina.

CONCLUSIONES

El uso del sistema de acolchado plástico permitió mayor desarrollo de las plantas de maíz pasando en promedio de altura de planta de 1,55 a 2,01 m. Así mismo, el cultivo de maíz bajo el sistema de acolchado plástico incrementó notablemente el rendimiento en grano seco de las variedades de maíz INIAP-101, INIAP-122, INIAP-193 e INIAP-199. En promedio, la producción pasó de 2,91 toneladas por hectárea con el manejo convencional, a 4,95 toneladas por hectárea con el sistema de acolchado, es decir, se incrementó la producción en 85%.



Se determinó que el costo de establecer un cultivo de maíz con acolchado plástico fue mayor que el sistema convencional, pero esa diferencia se redujo cuando se disminuyeron los costos de mano de obra por las labores culturales. El análisis de costo concluyó que el uso de acolchado plástico es una tecnología rentable y eficiente en términos económicos, proporcionando mayores ingresos netos y una mejor relación beneficio/costo, pasando de 2,14 en el sistema convencional a 2,55 del sistema con acolchado.

Por último, el uso de acolchado facilita el manejo del cultivo y mejora la productividad, lo que puede reducir significativamente los costos totales de producción. Por lo tanto, implementar esta estrategia resulta ser una manera efectiva de aumentar tanto la eficiencia como la rentabilidad en el cultivo de maíz.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su profundo agradecimiento a la Agencia de Corea para la Innovación de la Agricultura (KOPIA) por proporcionar los recursos necesarios a través del proyecto “Desarrollo de tecnologías de cultivo de maíz utilizando biofertilizantes en la Sierra del Ecuador. Fase II”, que ha permitido la realización y difusión de esta investigación. Así mismo, agradecemos al Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED) y a la Red Latinoamericana del Maíz por su apoyo en la difusión de nuestro trabajo de investigación.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Carlos Sangoquiza Caiza y José Zambrano Mendoza concibieron la investigación, desarrollaron la metodología, establecieron los ensayos en campo, analizaron los datos y redactaron el documento; Victoria López Guerrero aportó en el trabajo de campo, tabulación y análisis de los datos; Cristian Subía García aportó en la redacción, revisión y edición del manuscrito; Marcelo Racines Jaramillo realizó el análisis económico y la discusión de los resultados; Ana Pincay Verdezoto participó en el desarrollo de la metodología; y Chang Hwan Park desde la administración del proyecto aportó en la concepción de la investigación, proveyó recursos y la revisión de los resultados.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores de este artículo desean manifestar que no tienen ningún conflicto de interés que pueda influir en la investigación, análisis o redacción del contenido presentado.

REFERENCIAS

- [1] Instituto Nacional de Estadística y Censos (2022). *Estadísticas Agropecuarias*. Instituto Nacional de Estadística y Censos. <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/estadisticas-agropecuarias-2/>
- [2] Yáñez, C., Zambrano, J., Caicedo, M., Sánchez, V. y Heredia, J. (2003). *Catálogo de recursos genéticos de maíces de altura ecuatorianos conservados en el banco de germoplasma del Departamento Nacional de Recursos Fitogenéticos y Biotecnología (DENAREF)*. INIAP. <http://repositorio.iniap.gob.ec/jspui/handle/41000/43>
- [3] Zambrano, J.L., Velásquez, J., Peñaherrera, D., Sangoquiza, C., Cartagena, Y., Villacrés, E., Garcés, S., Ortíz, R., León, J., Campaña, D., López, V., Asaquibay, C., Nieto, M., Sanmartín G., Pintado, P., Yáñez, C. y Racines, M. (2021). *Manual Técnico No. 122: Guía para la producción sustentable de maíz en la Sierra ecuatoriana*. Repositorio digital INIAP. <http://repositorio.iniap.gob.ec/handle/41000/5796>
- [4] Hernández Pérez, A., Torres-Olivar, V., García Santiago, J. C. e Ibarra-Jiménez, L. (2021). Efectos del color del acolchado plástico en la producción de melón: dos ciclos. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 8(1). doi: <https://doi.org/10.19136/era.a8n1.2758>
- [5] Zambrano, J., Cartagena, Y., Sangoquiza, C., López, V., Parra, R., Maiguashca, J., Rivadeneira, J. y Park, Ch. (2022). Evaluación del acolchado plástico en la producción de maíz harinoso (*Zea mays* L. var. *amylacea* St.) en la Sierra del Ecuador. En A. Chávez, W. Guillén y F. Escobar (Eds.), *Memorias de la XXIV Reunión Latinoamericana de Maíz* (pp. 60-71). INIA.
- [6] Munguía-López, J., Zermeño-González, A., Gil-Marín, A., Quezada-Martín, M., Ibarra-Jiménez, L. y Arellano-García, M. A. (2011). Balance de energía en el cultivo de chile morrón bajo acolchado plástico. *Terra Latinoamericana*, 29(4), 431-440. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57322342009>
- [7] Li, X., Shi, H., Šimůnek, J., Gong, X. y Peng, Z. (2015). Modeling soil water dynamics in a drip-irrigated intercropping field under plastic mulch. *Irrigation Science*, 33, 289-302. doi: <https://doi.org/10.1007/s00271-015-0466-4>
- [8] Singh, A. (2014). Simulation-optimization modeling for conjunctive water use management. *Agricultural Water Management*, 141, 23-29. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.04.003>
- [9] Cantamutto, M., Ayastuy, M., Kroeger, I., Elisei, V. y Marinangeli, P. (2015). Efecto del sistema de iniciación y del acolchado del suelo sobre la producción de melón en el sur de la provincia de Buenos Aires, Argentina. *Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata*, 104(2), 157-162. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=1994588>
- [10] Steinmetz, Z., Wollmann, C., Schaefer, M., Buchmann, C., David, J., Tröger, J. y Schaumann, G. E. (2016). Plastic mulching in agriculture. Trading short-term agronomic benefits for long-term soil degradation. *Science of the total environment*, 550, 690-705. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.153>
- [11] Zribi, W., Faci González, J. M. y Aragués Lafarga, R. (2011). Efectos del acolchado sobre la humedad, temperatura, estructura y salinidad de suelos agrícolas. *ITEA, información técnica económica agraria*, 2, 148-162. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3689040>
- [12] Zambrano, J.L., Cartagena, Y., Sangoquiza, C., Pincay, A., Parra, A.R., Maiguashca, J., Rivadeneira, J.L., Subía, C. y Park, C.H. (2024). Exploring Plastic Mulching as a Strategy for Mitigating Drought Stress and Boosting Maize Yield in the Ecuadorian Andes. *Water* 2024, 16(7), 1033; <https://doi.org/10.3390/w16071033>
- [13] Zenner de Polanía, I. y Peña Baracaldo, F. (2013). Plásticos en la agricultura: beneficio y costo ambiental: una revisión. *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, 16(1), 139-150. doi: <https://doi.org/10.31910/rudca.v16.n1.2013.868>
- [14] Kader, M. A., Senge, M., Mojid, M. A. y Ito, K. (2017). Recent advances in mulching materials and methods for modifying soil environment. *Soil Tillage Res.* 168(1), 155-166. doi: <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.01.001>
- [15] Maida, P., Bisen, B.P. y Diwan, G. (2019) Effect of Plastic Mulch on Growth and Yield of Chilli (*Capsicum annum* L.). *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 8, 2056-2062. doi: <https://doi.org/10.20546/ijcm.2019.812.243>
- [16] Mendonca, S.R., Ávila, M.C.R., Vital, R.G., Evangelista, Z.R., Carvalho Pontes, N. y Reis Nascimento, A. (2021) The effect of different mulching on tomato development and yield. *Scientia Horticulturae*, 275, 109657. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109657>

- [17] López Guerrero, V. A., Zambrano Mendoza, J. L., Sangoquiza Caiza, C. A., Cartagena Ayala, Y. E., Rivadeneira García, J. L., Maiguashca, J. A. y Parra, R. (2021). Evaluación participativa del uso de acolchado plástico para la producción de maíz suave (*Zea mays* L. var. amyloacea) con agricultores de la Provincia de Cotopaxi en Ecuador. En A. Chávez, W. Guillen, F. Escobal (Eds.), *Memorias de la XXIV Reunión Latinoamericana de Maíz* (pp. 71-85). INIA. <https://repositorio.inia.gob.pe/handle/20.500.12955/1869>
- [18] Caviades, C. (2003). *INIAP-101: Variedad de maíz blanco precoz*. INIAP. <https://repositorio.iniap.gob.ec/bitstream/41000/2547/1/iniapscpl82.pdf>
- [19] Silva, E., Dobronsky, J. y Heredia, J. (1997). *INIAP-122 Chaucho Mejorado: Variedad de maíz amarillo harinoso semi-precoz para la provincia de Imbabura*. INIAP. <http://repositorio.iniap.gob.ec/handle/41000/2578>
- [20] Yáñez, C., Zambrano, J. L., Sangoquiza Caiza, C. A., López, V., Asaquiab, C., Nieto, M. y Racines Jaramillo, M. R. (2022). *La nueva variedad de Maíz Chulpi "INIAP-193"*. INIAP-EESC. <http://repositorio.iniap.gob.ec/handle/41000/5889>
- [21] Yáñez, C., Zambrano Mendoza, J. L., Caicedo, M., Heredia, J., Sangoquiza Caiza, C. A., Villacrés, E. y Caballero, D. (2017). *INIAP-199 "Racimo de Uva": Variedad de maíz negro*. INIAP. <http://repositorio.iniap.gob.ec/handle/41000/4618>
- [22] CIMMYT: Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo. (1995). Manejo de los ensayos e informe de los datos para el Programa de Ensayos Internacionales de Maíz del CIMMYT. CIMMYT. <http://hdl.handle.net/10883/3792>
- [23] Balzarini, M. G., Gonzalez, L. A., Tablada, E. M., Casanoves, F., Di Rienzo, J. A. y Robledo, C. W. (2008). *InfoStat, versión 2008: manual del usuario* (No. 005.30296 B198). Grupo InfoStat.
- [24] Velásquez, J. F., Dávila, J. H. y Jiménez, L. I. (1997). Caracterización agronómica de películas fotoselectivas para acolchado en el cultivo de chile Anaheim con fertirrigación. *Revista Agraria*, 13(1-2), 55-70. doi: <https://doi.org/10.59741/agraria.v13i1-2.226>
- [25] Wang, X., Wang, N., Xing, Y., Yun, J. y Zhang, H. (2018). Effects of plastic mulching and basal nitrogen application depth on nitrogen use efficiency and yield in maize. *Front. Plant Sci.* 9(1), 1-11. doi: <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01446>
- [26] Montemayor-Trejo, J. A., Suárez-González, E., Munguía-López, J. P., Segura-Castruita, M. Á., Mendoza Villarreal, R. y Woo-Reza, J. L. (2018). Acolchados plásticos para la producción de maíz (*Zea mays* L.) forrajero en la Comarca Lagunera. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 9(SPE20), 4107-4115. doi: <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i20.982>
- [27] Taday-Valdez, G., Cajamarca-Crespo, K., Gálvez-Palomeque, P. y Luna-Romero, Á. (2024). Evaluación del rendimiento del cultivo de maíz (*Zea mays* L.) bajo condiciones de Mulch plástico, Ecuador. *Revista Metropolitana de Ciencias Aplicadas*, 7(1), 172-180. doi: <https://doi.org/10.62452/3xmmyf38>
- [28] Zhang, P., Wei, T., Cai, T., Ali, S., Han, Q., Ren, X. y Jia, Z. (2017). Plastic-film mulching for enhanced water-use efficiency and economic returns from maize fields in semiarid China. *Frontiers in plant science*, 8, 512. doi: <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00512>
- [29] Calderón Reyes, B.G. y Flores Pérez, C.L. (2005). *Evaluación del desarrollo fenológico y productivo del cultivo de tomate variedad 3057 bajo dos sistemas de producción, acolchado y sin acolchado, en el Municipio de Chichigalpa en el ciclo 2004*. Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua-León. <http://riul.unanleon.edu.ni:8080/jspui/bitstream/123456789/917/1/198682.pdf>
- [30] Orozco-Santos, M., Preciado, J. C. G., Velázquez-Monreal, J. J., Hernández-Fuentes, L. M., Robles-González, M. M., Manzanilla-Ramírez, M. Á. y Manzo-Sánchez, G. (2023). Uso de Acolchados Plásticos para Reducir *Diaphorinia citri* 1-Huanglongbing e Incrementar el Rendimiento de Lima Mexicana en el Trópico Seco de México. *Southwestern Entomologist*, 47(4), 927-934. https://www.researchgate.net/publication/366904166_Use_of_Plastic_Mulch_to_Reduce_Diaphorinia_citri-Huanglongbing_and_Increase_Mexican_Lime_Yields_in_the_Dry_Tropic_of_Mexico
- [31] Nava, J. C. (2011). Beneficios socioeconómicos al utilizar plástico en el cultivo del melón (*Cucumis melo* L.) en el municipio Miranda del estado Zulia. *Revista de Ciencias Sociales (Ve)*, 17(3), 542-549. <https://www.redalyc.org/pdf/280/28022767013.pdf>
- [32] Pat-Fernández, V. G., Caamal-Cauich, I. y Caamal-pat, Z. H. (2016). Análisis técnico y económico de la producción de tomate verde en el oriente del Estado de México. *Handbook TI*, 51. https://www.ecorfan.org/handbooks/Ciencias-ECOH-T_III/HCSEH_TIII_6.pdf

Evaluación de algunos atributos de la calidad física y fisiológica de semillas de maíz dulce (*Zea mays sacharata*) bajo diferentes condiciones de almacenamiento y época de cosecha

Liliana Atencio^{1*}, José Tapia¹, Wilson Barragán², Emiro Suárez³, Abelardo Díaz¹, Iván Pastrana⁴

¹Corporación colombiana de investigación agropecuaria – AGROSAVIA, CI. Turipaná, Colombia.

²Corporación colombiana de investigación agropecuaria – AGROSAVIA, CI. El Nus, Colombia.

³Corporación colombiana de investigación agropecuaria – AGROSAVIA, Carmen de Bolívar, Colombia.

⁴Universidad de Córdoba, Colombia

*Autor para correspondencia/Corresponding author: latencio@agrosavia.co

Evaluation of some physical and physiological quality attributes of sweet corn (*Zea mays sacharata*) seeds under different storage conditions and harvesting season

Resumen

En Colombia el maíz dulce (*Zea mays sacharata*) es de gran importancia para los productores y consumidores del grano en fresco. AGROSAVIA ha generado una nueva variedad de maíz dulce para pequeños productores de la región Caribe, los cuales pueden producir su propia semilla. El objetivo del estudio fue evaluar la calidad fisiológica de semilla de maíz dulce bajo diferentes condiciones de almacenamiento, empaques y época de cosecha. Se establecieron dos experimentos, cuarto frío y condiciones ambientales, en el Laboratorio de Química Analítica de AGROSAVIA, donde se evaluó el efecto de los empaques y la época de cosecha sobre la germinación, viabilidad, temperatura y humedad de semillas de maíz dulce. Los resultados del análisis de varianza mostraron que la germinación y viabilidad de la semilla en condiciones de cuarto frío (10 °C y 60 HR) fue mayor ($P < 0,05$) cuando se almacenó en empaque de plástico (81,9 %), en comparación al papel (76,3%). Mientras que, bajo condiciones de temperatura ambiente (28 °C y 85 HR) el mayor porcentaje de germinación ($P < 0,05$) se presentó en el empaque plástico desde los 60 a los 120 días de almacenamiento en semilla cosechada a los 90 días. Acorde a este estudio la semilla de maíz dulce se puede cosechar en madurez fisiológica (90 días) y empacar en envases plásticos conservando la calidad hasta por 120 días. En caso de ser empacada en bolsas de papel, la germinación se puede reducir drásticamente a partir de los 60 días de almacenamiento.

Palabras clave: viabilidad, vigor, germinación, humedad, madurez fisiológica, calidad.

Abstract

In Colombia, sweet corn (*Zea mays saccharate*) is of great importance for producers and consumers of fresh grain. Agrosavia has developed a new variety of sweet corn for small producers in the Caribbean region who can produce their own seed. The



Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /
Edited by:

María Gabriela Albán

Recibido /
Received:
20/04/2024

Aceptado /
Accepted:
29/07/2024

Publicado en línea /
Published online:
27/02/2025



study aimed to evaluate the physiological quality of sweet corn seed under different storage, packaging and harvesting conditions. Two experiments, cold storage and environmental conditions, were established at the Analytical Chemistry Laboratory of AGROSAVIA, where the effect of packaging and harvest time on germination, viability, temperature and humidity of sweet corn seeds was evaluated. The seed germination and viability under cold storage conditions (10 °C and 60 RH) were higher ($P < 0.05$) when stored in plastic packaging (81.9 %) compared to paper (76.3 %). For environmental temperature conditions (28 °C and 85 RH), the highest germination percentage ($P < 0.05$) was presented in the plastic packaging from 60 to 120 days of storage in seed harvested at 90 days. According to this study, sweet corn seed can be harvested at physiological maturity (90 days) and packaged in plastic containers preserving the quality for up to 120 days. Paper bag treatment germination can be drastically reduced after 60 days of storage. These findings have practical implications for seed producers and small-scale farmers, providing recommendations on the optimal storage and packaging conditions for sweet corn seeds to maintain their quality and viability.

Keywords: viability, strength, germination, moisture, physiological maturity, quality.

INTRODUCCIÓN

El maíz dulce se destaca por ser un alimento con altos contenidos de azúcares, vitamina A y C y bajos contenidos de grasa, factores que se consideran de importancia en la alimentación humana [1]. Pese a los beneficios en la salud y su amplio uso en la industria, la ampliación de las áreas del cultivo está limitada en muchos casos por el rápido deterioro que presenta la semilla, que conlleva a la baja tasa de germinación y vigor de las plántulas, generando pérdidas durante las etapas de producción y almacenamiento [2].

En Colombia, este tipo de maíz se siembra en pequeñas áreas, con el uso de semillas de híbridos importados, cuyo producto se destina a la industria; y variedades mejoradas, primordialmente utilizadas por pequeños productores bajo sistemas productivos tradicionales, quienes contribuyen con su producto a la seguridad alimentaria. En este sentido se destacan las variedades de maíz dulce CORPOICA V-115 DULCE y AGROSAVIA V-116 HAWAII recomendadas para sistemas tradicionales [3], con las que el productor bajo un manejo adecuado puede obtener la semilla del ciclo anterior, almacenar y utilizar en próximos ciclos.

La semilla es la unidad de reproducción de las plantas que tiene como función la multiplicación y por lo tanto la persistencia de las especies [4]. En el ámbito agrícola, representa el principal insumo del cultivo, y determina en gran parte la sostenibilidad productiva y económica en los sistemas de producción [5]. De la calidad de la semilla, depende la aparición de problemas fitosanitarios, el desarrollo y crecimiento de las plantas, la producción y, por lo tanto, los costos generados en el sistema de producción [6,7,8]. El comportamiento de la semilla está asociados a la calidad que involucran criterios genéticos, físicos, fisiológicos y sanitarios, determinados por el genotipo, condiciones climáticas, labores del cultivo, madurez de la semilla, almacenamiento y conservación de la semilla.



La calidad fisiológica de las semillas corresponde al desempeño en la germinación y desarrollo de plantas normales, que se traduce en la viabilidad y el vigor [9]. Es importante aclarar que, la germinación es el proceso mediante el cual una semilla desarrolla estructuras embrionarias y emerge como una plántula viable. El vigor de la semilla se refiere a su capacidad intrínseca para germinar y establecerse como una planta vigorosa, influenciado por factores genéticos y ambientales que determinan la viabilidad y el rendimiento de las plántulas [10]. Por otro lado, la dormancia es un estado fisiológico que impide la germinación incluso en condiciones ambientales favorables, regulado por señales internas y externas que afectan la respuesta de la semilla al ambiente [11]. Estos conceptos son fundamentales para entender los procesos de establecimiento y crecimiento de las plantas desde la etapa inicial de la semilla hasta la plántula completa. Una de las estrategias para determinar la calidad fisiológica de las semillas es mediante la evaluación de métodos convencionales como la prueba de germinación y la prueba de tetrazolio [12]; esta última técnica, permite conocer de forma específica la calidad de la semilla para su establecimiento [2]. Para evaluar la calidad fisiológica, las pruebas de vigor pueden predecir el comportamiento de un lote de semillas específico cuando es sometido a condiciones que no son del todo favorables para que emerjan las plántulas [6]. El objetivo de la investigación consistió en evaluar algunos atributos de calidad física y fisiológica de la semilla de una variedad de maíz dulce bajo diferentes condiciones de almacenamiento y época de cosecha.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación

El trabajo se realizó en el Laboratorio de Química Analítica, del centro de investigación Turipaná de AGROSAVIA, localizado en Cereté, Córdoba – Colombia, ubicado a 8° 52' de latitud Norte y 76° 48' longitud Oeste, respecto al meridiano de Greenwich, a una altura de 13 m.s.n.m.

Material vegetal

Se utilizó semilla de maíz (*Zea mays sacharata*) proveniente de un campo de multiplicación de la variedad dulce AGROSAVIA V-116 Hawaii, establecida en el semestre 2022-A.

Diseño estadístico

Se establecieron dos experimentos independientes en función de la condición de almacenamiento, en cuarto frío con temperatura media de 10 °C y humedad relativa de 60 %, y cuarto oscuro bajo condiciones ambientales, temperatura media 28 °C y humedad relativa 85 %. Cada ensayo se desarrolló bajo un diseño de bloques completos al azar en arreglo factorial. Se consideraron como efectos los factores tipo de empaques (tanques plásticos cilíndrico con tapa de rosca de dos litros de capacidad y bolsas de papel tipo kraft de 1 kilogramo de capacidad) y momento de cosecha del maíz (90 días, madurez fisiológica y 120 días, madurez comercial). Se usaron tres repeticiones en cada experimento y la unidad experimental estuvo compuesta por un kilo de semillas.



La investigación se llevó a cabo entre septiembre del año 2022 y julio del 2023. Durante este tiempo de almacenamiento, en ambos experimentos se realizó monitoreo de la semilla con evaluaciones cada 30 días, desde el día cero hasta los 120 días.

VARIABLES DEPENDIENTES

Viabilidad (%): Se tomaron 30 semillas por muestra, las cuales se sumergieron en agua destilada. Transcurridas 24 horas, se le realizó un corte longitudinal a cada semilla sobre el plano del embrión. De cada semilla se tomó la mitad y se colocó en un recipiente de vidrio con una solución de tetrazolio al 0.05 %, en incubadora a 25 °C por dos horas. Transcurrido el tiempo de incubación, se realizó la clasificación de las semillas en viables o no, en función a la intensidad y distribución de la coloración que presentó el embrión.

Germinación (%): Se realizó la prueba de germinación estándar entre papel [13], que consistió en colocar 50 semillas distribuidas uniformemente en cinco hileras sobre toallas de papel humedecidas con agua destilada. Después, se cubrieron con el mismo tipo de toalla húmeda y se colocaron en bolsas plásticas de cierre hermético. El conteo de semillas germinadas se realizó a los 6 días.

Contenido de humedad (%): Se determinó con un equipo portátil de lectura directa de marca AGRATRONIX, para lo cual se tomó la cantidad de semilla suficiente para llenar el vaso del equipo y registrar la lectura.

Temperatura de la semilla (°C): Se utilizó un termómetro (infrarrojo) BERRCOM JXB-178 en modo SurFace temp. Para realizar la medición, inicialmente se destapó cada uno de los envases (papel o plástico), una vez descubierta la semilla se apuntó con el termómetro y se tomó la lectura.

Análisis estadístico: El análisis de la información se llevó a cabo mediante un ANOVA de efectos mixtos para cada experimento. Se consideraron como efectos fijos el tipo de empaque, el tiempo de cosecha, el tiempo de almacenamiento e interacción entre estos factores. Como efecto aleatorio se consideró el factor de bloqueo. En cada una de las variables analizadas, se consideró el cumplimiento de supuestos del análisis de varianza (normalidad y homogeneidad de varianza en residuales). En caso de violación de los supuestos, se emplearon modelos generalizados utilizando distribuciones beta o lognormal, de acuerdo con la naturaleza de las variables y criterios de bondad y ajuste de modelos Akaike y Bayesiano. En caso de rechazo de la hipótesis nula, se empleó la prueba de Tukey para separación de media. En todos los casos se consideró un error alfa de 0.05. Los análisis estadísticos se desarrollaron empleando el software R Project versión 4.3.1 Beagle Scouts mediante las librerías lme4 y glmmTMB. Para el análisis de la presencia de plagas se desarrolló una prueba de χ^2 considerando como presencia de plagas una evaluación mayor al 1 % del porcentaje de semillas afectadas.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Los resultados del análisis de varianza para los dos experimentos evaluados, condiciones de almacenamiento en cuarto frío y temperatura ambiente, se presentan en la Tabla 1.

TABLA 1. Probabilidad de los factores y sus interacciones para la evaluación de la calidad fisiológica de la semilla de maíz dulce para el experimento en cuarto frío y en temperatura ambiente.

	CUARTO FRÍO				AMBIENTE			
	GERM	HUM	TEMP	VIAB	GERM	HUM	TEMP	VIAB
Momento de cosecha (C)	0,25195 NS	<0,0001	0,6607	0,0474	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,002433
Tipos de empaque (EM)	0,08743 NS	<0,0001	<0,0001	0,0056	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Tiempo de almacenamiento (T)	0,09706 NS	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
C × EM	0,27771 NS	<0,0001	0,34185 NS	0,4621 NS	0,008582	<0,0001	<0,0001	<0,0001
C × T	0,16988 NS	0,00051	<0,0001	0,0004	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,000414
EM × T	0,94061 NS	<0,0001	<0,0001	0,6301	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
C × EM × T	0,22269 NS	0,010239	0,0057	0,14164 NS	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,206346 NS

GERM: Germinación (%); HUM: Contenido de humedad (%), TEMP: Temperatura (°C), VIAB: Viabilidad (%), ns: no hubo significancia. Probabilidad al 0,01 (Pr). Tomado de: fuente propia.

Para el experimento en cuarto frío, no se observó efecto ($P > 0,05$) de los factores principales o interacciones evaluadas en el porcentaje de germinación, el cual varió entre 97,3 y 98 %. Por su parte, el porcentaje de humedad de la semilla fue afectado ($P < 0,05$) tanto por los efectos fijos evaluados como por sus interacciones. Con relación a la temperatura de la semilla, sólo se registró efecto ($P < 0,05$) del tipo de empaque, tiempo de almacenamiento e interacciones tiempo de almacenamiento por momento de cosecha, tipo de empaque por momento de cosecha y la interacción triple entre momento de cosecha, tipo de empaque y tiempo de almacenamiento. En cuanto a la viabilidad de la semilla, se observó efecto ($P < 0,05$) del tipo de empaque, tiempo de almacenamiento y de la interacción momento de cosecha por tiempo de almacenamiento.

La Figura 1, ilustra la triple interacción para el porcentaje de humedad y temperatura de la semilla en condiciones de cuarto frío. El mayor porcentaje de humedad (entre 14,4 % y 14,6 %) se registró para la semilla cosechada a los 120 días y almacenada en empaque plástico, el cual no varió entre los 30 y 120 días de almacenamiento. Estos porcentajes de humedad fueron diferentes ($P < 0,05$) a los observados en la semilla empacada en papel y cosechada a los 120 días, y para las semillas empacadas en papel o plástico y cosechadas a los 90 días; en esta última condición, se observaron los registros más bajos de humedad en las semillas empacadas en papel y almacenadas entre los 60 y 90 días. Adicionalmente, es importante resaltar que los contenidos de humedad obtenidos en condiciones de cuarto frío contribuyeron positivamente con la calidad sanitaria de la semilla, ya que no se evidenció la presencia de plagas.

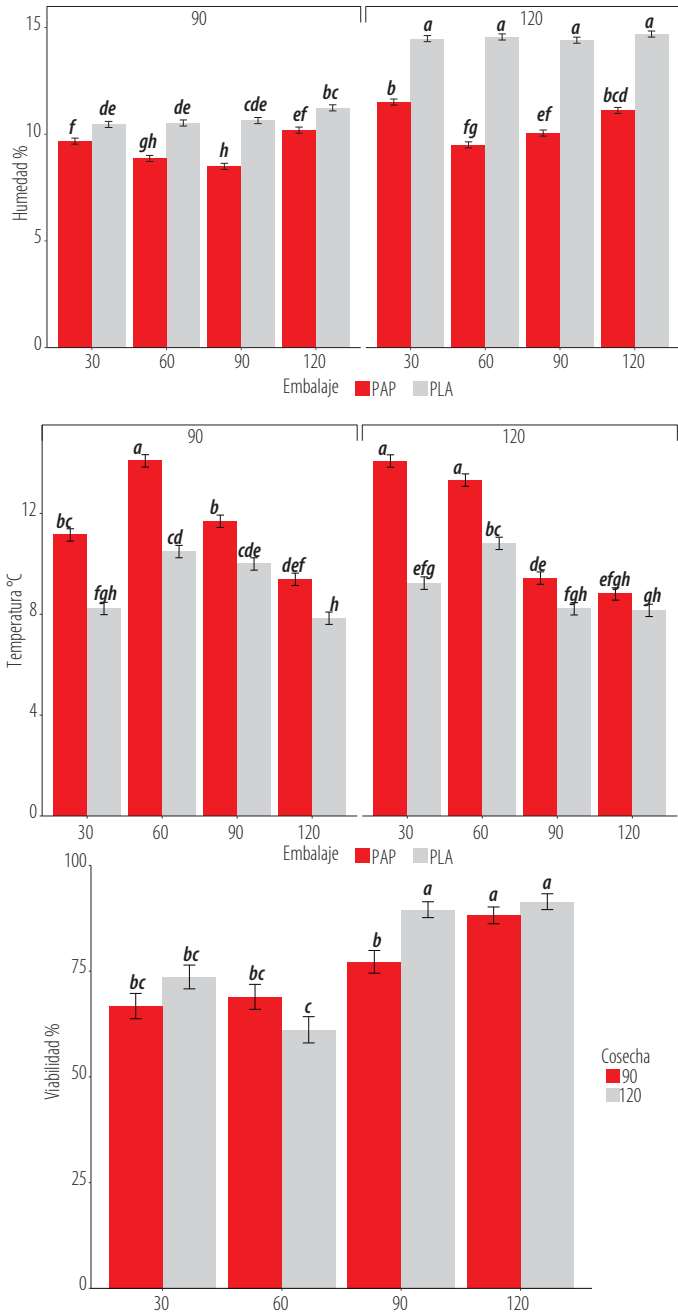


Figura 1. Efecto del tiempo de cosecha, tiempo de almacenamiento y empaque en la humedad, temperatura, y viabilidad de semilla de maíz dulce bajo condiciones de cuarto frío. PAP: empaque de papel, PLA: empaque plástico. Tomado de: fuente propia.



Para el caso de la temperatura a los 90 días de cosecha independientemente del tipo de empaque, la temperatura de la semilla se incrementó ($P < 0,05$) al pasar de los 30 a los 90 días de almacenamiento en 2,94 °C para papel y 2,25 °C para empaque en plástico. Posteriormente, se observó un descenso de la temperatura hasta alcanzar valores de 9,38 °C en papel y 7,84 °C en plástico, sin diferencias entre ellos ($P > 0,05$). Por su parte, para la semilla cosechada a los 120 días, se observó diferencia ($P < 0,05$) en la temperatura de la semilla hasta los 90 días de almacenamiento, con mayor temperatura de la semilla empacada en papel ($P < 0,05$) con diferencias de 4,48 °C, 2,51 °C y 1,22 °C a los 30, 50 y 90 días, respectivamente, comparada con la almacenada en plástico. El aumento de la temperatura durante el desarrollo y almacenamiento de las semillas puede tener un impacto significativo en su calidad fisiológica. Estudios recientes han demostrado que temperaturas elevadas pueden afectar negativamente la viabilidad, el vigor y otros atributos de las semillas de maíz como, por ejemplo, cuando hay estrés por calor durante la fase de desarrollo puede reducir la germinación y alterar la estructura y función de las proteínas y enzimas cruciales para el metabolismo germinativo [14]. Este efecto puede comprometer la capacidad de las semillas para germinar eficientemente bajo condiciones óptimas de siembra, afectando así el rendimiento potencial de los cultivos.

La viabilidad de la semilla en condiciones de cuarto frío fue mayor ($P < 0,05$) cuando se almacenó en empaque de plástico (81,9 %), en comparación al papel (76,3 %). Sin embargo, independientemente del empaque, se observó que el almacenamiento mejoró la viabilidad de la semilla en función al momento de la cosecha (Figura 1).

Con relación al tiempo de cosecha, la viabilidad de la semilla en ambiente de cuarto frío no se afectó ($P > 0,05$) con almacenamiento entre 30 y 60 días 61,1 % y 73,6 % tanto para la semilla cosechada a los 90 como a los 120 días. Sin embargo, a partir de los 90 días de almacenamiento, la semilla cosechada en madurez comercial (120 días) mejora su viabilidad alcanzando valores entre 89,5 % y 91,4 %. Por su parte, la semilla cosechada a los 90 días necesitó de 120 días de almacenamiento para alcanzar una viabilidad de 88,1 % (Figura 1).

En el caso del experimento a temperatura ambiente, a excepción del porcentaje de viabilidad de la semilla, las demás variables evaluadas tuvieron interacción triple (Figura 2) de los efectos de momento de cosecha, tipo de empaque y tiempo de almacenamiento ($P < 0,05$).

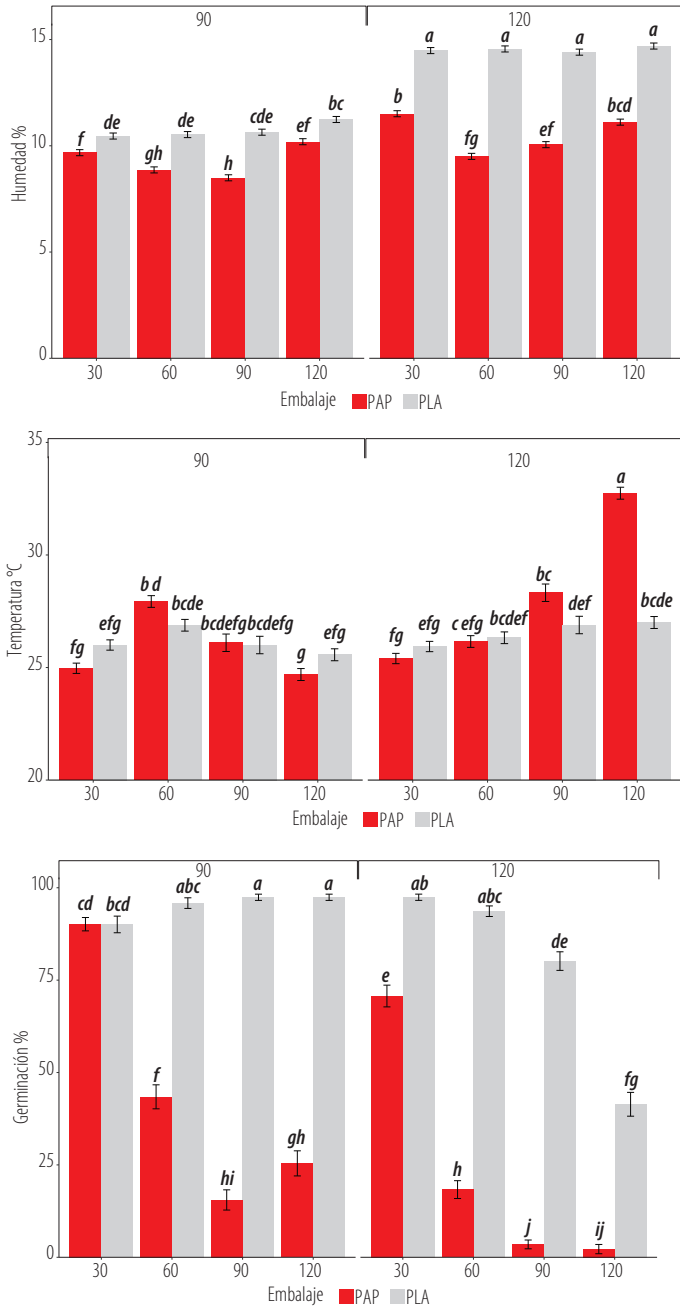


Figura 2. Efecto del momento de cosecha, tiempo de almacenamiento y empaque en la temperatura, humedad y germinación de semilla de maíz dulce bajo condiciones de temperatura ambiente. PAP: empaque de papel, PLA: empaque plástico. Tomado de: fuente propia.



La mayor ($P < 0,05$) temperatura en la semilla se registró a los 120 días de almacenamiento en empaque de papel y cosechada a los 120 días después de la siembra (Figura 2). Contrario a lo anterior, no se observó ($P > 0,05$) variación de la temperatura en semilla cosechada a los 90 o 120 días y almacenada en empaque plástico, con valores entre 25,5 y 27 °C. Por su parte, el porcentaje de humedad fue mayor a los 60 días de almacenamiento, en semilla cosechada a los 90 días y almacenada en empaque de papel (19,9%); este porcentaje fue diferente del observado a los 30, 90 y 120 días de almacenamiento en papel cosechada a los 90 días y del registrado en la semilla cosechada a los 120 días en las mismas condiciones de empaque y en los cuatro tiempos de almacenamiento, los cuales registraron un porcentaje de humedad entre 17,4 % y 17,9 % ($P > 0,05$). Para el caso de la semilla almacenada en empaque de plástico, se registró menor ($P < 0,05$) porcentaje de humedad en la semilla cosechada a los 90 días, sin variación en el tiempo de almacenamiento (12,1% - 12,8%), comparada con la semilla cosechada a los 120 días (15,4%-16,5%).

Para el porcentaje de germinación, el mayor valor ($P < 0,05$) se obtuvo para la semilla empacada en plástico desde los 60 a los 120 días de almacenamiento en semilla cosechada a los 90 días y de los 30 hasta los 60 días de almacenamiento para semillas cosechadas a los 120 días, con un rango entre el 93% y 97%. Por su parte, el mayor porcentaje de germinación en semilla empacada en papel se obtuvo para cosecha a 90 días, con 30 días de almacenamiento (90,1%) (Figura 2).

La Figura 3, presenta la interacción entre los factores momento de cosecha y tiempo de almacenamiento, momento de cosecha y tipo de empaque, y tipo de empaque por tiempo de almacenamiento. Con relación a la viabilidad de la semilla en función al momento de cosecha, el mayor registro de porcentaje de semilla viable se obtuvo para la semilla de maíz cosechada a los 90 días y almacenada por 30 días (79,3%), seguido ($P < 0,05$) de la semilla cosechada los 120 después de la siembra y almacenada al mismo tiempo; sin embargo, pese a registrar diferencias significativas entre los registros observados, por encima de los 30 días de almacenamiento la viabilidad de la semilla cae a menos del 50 % independientemente del momento de cosecha. Con relación al tipo de empaque, la semilla almacenada en papel pierde viabilidad después de los 30 días de almacenamiento ($P < 0,05$) pasando de porcentajes de viabilidad del 70 % a los 30 días, a valores entre 18 % y 23 % entre los 60 y 90 días de almacenamiento. Por el contrario, el almacenamiento en empaque plástico presentó un porcentaje de viabilidad entre 72 % y 73 % a los 30 y 90 días de almacenamiento ($P > 0,05$). Estos resultados son similares al comportamiento del tipo de empaque según el momento de cosecha de la semilla, donde se observó que independientemente del momento de cosecha (90 o 120 días), la semilla empacada en plástico tiene un mayor porcentaje de viabilidad con valores entre 65,1 % y 70,2 %. Por su parte, la semilla empacada en papel, aunque con diferencias entre ellos ($P < 0,05$), registró valores de viabilidad menores al 50 % ya sea cosechada a los 90 o 120 días.

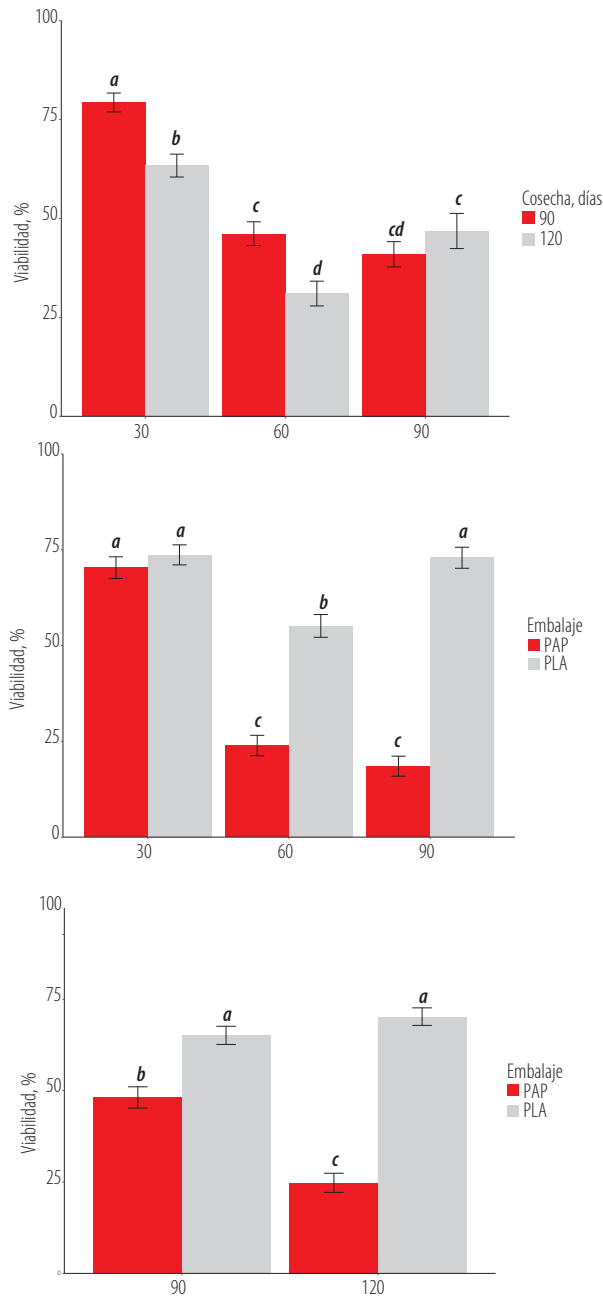


Figura 3. Efecto del tiempo de almacenamiento por momento de cosecha (A); tiempo de almacenamiento por tipo de empaque (B); y momento de cosecha por tipo de empaque (C) en la viabilidad de semilla de maíz dulce bajo condiciones de temperatura ambiente. PAP: empaque de papel, PLA: empaque plástico. Tomado de: fuente propia.



Con relación a la presencia de plagas se encontró dependencia entre tipo de empaque ($\text{Chi}^2 = 4.0179$, $\text{df} = 1$, $\text{p-value} = 0.0450$) y tiempo de almacenamiento ($\text{Chi}^2 = 9$, $\text{df} = 2$, $\text{p-value} = 0.0111$). Para el caso del tipo de empaque, se observó mayor probabilidad de presencia de plagas en semillas empacadas en papel (19,4 % vs 2,7 %); por su parte, las semillas almacenadas por 90 días presentaron mayor probabilidad de registrar presencia de plagas con un porcentaje de 16,6 % frente a 5,5 % obtenido a los 30 días y 0 % a los 30 días.

En general, la germinación fue mayor al 90 % cuando el almacenamiento se realizó bajo condiciones de cuarto frío, principalmente, con el uso de empaques plásticos. Es una precisión similar a la de Capilheira et al. [15] quienes aducen que empacar y almacenar bajo condiciones controladas favorables de temperaturas y humedad permite preservar la calidad fisiológica de las semillas de maíz. Asimismo, Bakhtavar et al. [16], en estudios realizados encontraron que la mayor germinación (>85 %), se obtuvo cuando la semilla se almacenó en empaques plásticos, manteniendo bajos contenidos de humedad en esta.

Para este experimento, se observó que la semilla de maíz dulce en empaques plásticos conserva más su calidad fisiológica, asociado principalmente, a un porcentaje de germinación más alto (95,7 %) frente a los empaques de papel los cuales presentaron promedios del 75 %, lo que ocurrió también con la viabilidad. Por el contrario, la semilla empacada en papel disminuyó la germinación y viabilidad hasta en un 50 % a los 90 días de cosecha, encontrándose que a los 120 días la semilla pierde la calidad drásticamente con valores de germinación y viabilidad inferiores al 25%. La calidad de la semilla de maíz puede ser afectada por diversos factores, incluyendo el tipo de empaque utilizado durante el almacenamiento. Estudios recientes han destacado que tanto los empaques de plástico como los de papel pueden influir en la longevidad y viabilidad de las semillas. Por ejemplo, el uso de empaques de plástico adecuadamente diseñados puede proporcionar una barrera eficaz contra la humedad y los gases, ayudando a mantener las condiciones óptimas de almacenamiento y prolongando la viabilidad de las semillas [17]. Por otro lado, el empaque de papel puede ser menos efectivo para mantener condiciones estables de almacenamiento a largo plazo, especialmente en ambientes con fluctuaciones de temperatura y humedad. Esto sugiere que los empaques plásticos pueden ser una opción práctica y de bajo costo para que el productor guarde su propia semilla. De acuerdo con Tapia et al. [18], una germinación superior al 90 % en semilla de maíz garantiza la calidad fisiológica.

Los resultados mostraron que la semilla cosechada a los 90 días presentó visualmente una capa negra en el punto de unión con la tuza, indicador del punto de madurez fisiológica. A esta edad la semilla obtuvo los mayores valores de germinación (92,6 %) y viabilidad (64,9 %) frente a la semilla cosechada a los 120 días, madurez comercial, con una germinación y viabilidad de 84,1 y 61,9 %, respectivamente. Harakotr et al. [19], al evaluar maíces dulces, encontró que la madurez fisiológica se presentó a los 38 días después de la polinización, correspondiente a los 90 días después de la siembra, lo que indica que la semilla se encuentra completamente formada con potencial para germinar.

Por otra parte, los valores inferiores de viabilidad con respecto a germinación, se deben principalmente a las características propias de la semilla, que está dada por su apariencia arrugada e irregular, con carencia de almidones y bajo contenido de polisacáridos



solubles en agua, lo que afecta el proceso de absorción de agua y [7, 20] por lo tanto la tinción siendo esta más pálida o poco visible, lo que afectó la lectura de la prueba de tetrazolio, generando una baja respuesta en esta variable. Acorde a esto Maldonado-Peralta et al. [21] exponen que la tinción de color rosa intenso en el embrión, indica una alta viabilidad y vigor.

También Harakotr et al. [19], indican que los genotipos que evaluaron mantuvieron contenidos altos de humedad con valores entre 28,67 y 64,84 %, y recomiendan que la cosecha debe realizarse cuando la humedad del grano es inferior al 35 %. Con respecto a esto, la semilla de maíz dulce de la presente investigación presentó valores por debajo del 25 % para ambas condiciones de almacenamiento y momentos de cosecha. Según Escobar-Alvarez et al. [22] es importante conservar la semilla en óptimas condiciones, logrando mantener contenidos de humedad adecuados en la semilla con el fin de reducir pérdidas en la calidad física.

Los resultados de este experimento indicaron que la semilla de maíz dulce se puede cosechar en madurez fisiológica (90 días) y empacar en envases plásticos conservando la calidad hasta por 120 días. Mientras que, si la semilla es empacada en bolsas de papel, la germinación se puede reducir drásticamente a partir de los 60 días de almacenamiento. Esto indica que el almacenamiento de la semilla en bolsas de papel bajo condiciones ambientales puede promover al deterioro de la semilla, además de ser afectado por problemas fitosanitarios, que afectan tanto la calidad fisiológica como sanitaria de la semilla. La calidad de la semilla de maíz puede variar significativamente dependiendo de si se cosecha en madurez fisiológica o madurez comercial. La madurez fisiológica se refiere a cambios morfofisiológicos en la semilla, como el cese de la translocación de sustancias solubles de la planta hacia la semilla y la reducción del contenido de humedad, los cuales varían según el genotipo y las condiciones ambientales [23], mientras que la madurez comercial está asociada a los requerimientos del mercado [24], basados en criterios como el contenido de humedad y el aspecto de la mazorca. Mancera-R [25] indica que las semillas cosechadas en madurez fisiológica tienden a presentar la mejor calidad fisiológica exhibiendo altos porcentajes de germinación; sin embargo, Mendoza et al. [26] consideran que la calidad de la semilla depende principalmente del clima y de las condiciones de crecimiento y desarrollo del cultivo.

Lo anterior, es una alternativa de conservación para que el productor pueda mantener este tipo de variedades de maíz promoviendo así la autonomía en sus sistemas de producción, además de reducir los costos de producción, al utilizar semilla producida por ellos mismos, manteniendo su calidad. Es fundamental que todas las semillas conserven los cuatro aspectos de la calidad: genética, física, fisiológica, y sanitaria ya que esto favorece la conservación y persistencia de las especies, alta tolerancia a condiciones ambientales adversas y al incremento de la productividad y calidad de las cosechas [22].

AGRADECIMIENTOS

A la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA) por apoyar y financiar la elaboración del presente manuscrito que se enmarca en el proyecto "Plan Nacional Semillas en sus fases 1 y 2". Al Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología



para el Desarrollo (CYTED) por financiar un proyecto que permite el relacionamiento entre investigadores para realizar el manuscrito. Al comité organizador de la XXV Reunión Latinoamericana del Maíz por apoyar constantemente la temática del presente artículo.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

José Tapia y Liliana Atencio, conceptualización, investigación, curación de los contenidos y datos, metodología, redacción y edición. Abelardo Cabadiáz, investigación, metodología y redacción. Wilson Barragán, Emiro Suárez, Ivan Pastrana, análisis formal de los datos, redacción y edición.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses en el presente trabajo.

REFERENCIAS

- [1] Adinurani, P. G., Rahayu, S., Budi, L. S., Pambudi, S., & Soni, P. (2019). Production potential of sweet corn (*Zea mays* Linn. var. *Saccharata* Sturt) 'Bonanza' to different planting pattern and phosphorus sources. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 293(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/293/1/012032>
- [2] Qiu, G., Lü, E., Lu, H., Xu, S., Zeng, F., & Shui, Q. (2018). Single-kernel FT-NIR spectroscopy for detecting supersweet corn (*Zea mays* L. *saccharata* sturt) seed viability with multivariate data analysis. *Sensors*, 18(4), 1010. <https://doi.org/10.3390/s18041010>
- [3] Tapia Coronado, J. J., Mejía Kerguelen, S. L., Atencio Solano, L. M., Sánchez Rodríguez, L. A., Cañar Serna, D. Y. (2022). Situación actual y avances tecnológicos para mejorar la productividad del cultivo de maíz en Colombia. *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías*, 14(1), <https://doi.org/10.18272/aci.v14i1.2585>
- [4] Doria, J. (2010). Generalidades sobre las semillas: Su producción, conservación y almacenamiento. *Cultivos Tropicales*, 31(1). http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362010000100011&lng=es&tng=es
- [5] Federación Nacional de Cultivadores de Cereales y Leguminosas FENALCE. (2023). Histórico del área, producción y rendimiento de cereales, leguminosas y soya. <https://fenalce.co/estadisticas/>
- [6] Estrada-Urbina, J., Cantú-López, E., Molina-Moreno, J. C., & Estrada-Gómez, J. A. (2023). Physiological maturity in maize (*Zea mays* L.) seeds through morphological markers and moisture content. *Agronomía Mesoamericana*, 34(3). <https://doi.org/10.15517/am.2023.53269>
- [7] França-Neto, L.; & Krzyzanowski, F. (2022). Use of the tetrazolium test for estimating the physiological quality of seeds. *Seed Science and Technology*, 50(1), 31-44. <https://doi.org/10.15258/sst.2022.50.1.s.03>
- [8] Wagner-Medina, E. V., Castro, A. M. S., & Ocampo, C. P. R. (2021). Sistema de semillas en Colombia: Consideraciones sobre calidad y agrobiodiversidad. *Estudios Rurales. Publicación Del Centro de Estudios de La Argentina Rural*, 11(22). <https://doi.org/10.48160/22504001er22.39>
- [9] Magdaleno-Hernández, E., Magdaleno-Hernández, A., Mejía-Contreras, A., Martínez-Saldaña, T., Jiménez-Velázquez, M. A., Sánchez-Escudero, J., & García-Cué, J. L. (2020). Evaluation of the physical and physiological quality of native maize seed. *ASyD*, 17(3). <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20203503426>
- [10] Basra, A. S. (2023). Seed Germination, Physiology, and Biochemistry (3rd ed.). *CRC Press*.
- [11] Baskin, J. M. & Baskin, C. C. (2023). Seeds: Ecology, Biogeography, and Evolution of Dormancy and Germination (3rd ed.). *Elsevier*.
- [12] Yaman, F., & Kahrman, F. (2022). Classification of viable/non-viable seeds of specialty maize genotypes using spectral and image data plus morphological features. *Journal of Crop Improvement*, 36(2), 285-300. <https://doi.org/10.1080/15427528.2021.1960942>
- [13] International Seed Testing Association, ISTA. (2016). Reglas Internacionales para el Análisis de las Semillas 2016. *Zürich: ISTA*. https://vri.umayor.cl/images/ISTA_Rules_2016_Spanish.pdf
- [14] Smith, J. K., García, M. A. & López, R. H. (2023). Impact of high temperature stress during seed development on maize seed physiological quality. *Journal of Agronomy*, 15(2), 123-135.
- [15] Capilheira, A. F., Silva, J. G., Pinto, K. V., Gadotti, G. I., & Carvalho, I. R. (2024). Corn seeds stored under varying storage conditions. *Engenharia Agrícola*, 44, <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v44e20220136/2024>
- [16] Bakhtavar, M. A., Afzal, I., & Ahmed Basra, S. M. (2019). Moisture adsorption isotherms and quality of seeds stored in conventional packaging materials and hermetic Super Bag. *PLoS ONE*, 14(2). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0207569>
- [17] García, A., Martínez, B., & López, C. (2024). Influence of packaging materials on maize seed quality during storage. *Seed Science and Technology*, 42(1), 45-56.
- [18] Tapia Coronado, J. J., Mejía Kerguelen, S. L., Atencio Solano, L. M., Sánchez Rodríguez, L. A., & Cañar Serna, D. Y. (2021). Manual técnico de producción de semilla de variedades de maíz para el Caribe húmedo colombiano. *Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria Agrosavia*. <https://doi.org/10.21930/agrosavia.manual.7404517>



- [19] Harakotr, B., Sutthiluk, W., & Rithichai, P. (2022). Changes on sugar and starch contents during seed development of synergistic sweet corn and implication on seed quality. *International Journal of Agronomy*. <https://doi.org/10.1155/2022/6550474>
- [20] Montoro, A. & Ruiz, M. (2017). Ecofisiología del cultivo de maíz dulce (*Zea mays l. Var. Saccharata*). *Horticultura Argentina* 36 (91), <https://www.horticulturaar.com.ar/es/articulos/ecofisiologia-del-cultivo-de-maiz-dulce-zea-mays-l-var-saccharata.html>
- [21] Maldonado-Peralta, M. A.; García de los Santos, G.; García-Nava, J. R.; Ramírez-Herrera, C.; Hernández-Livera, A.; Valdez-Carrasco, J. M.; Torres-Corona, T.; Cetina-Alcalá, V. W. (2016) Seed viability and vigour of two nanche species (*Malpighia mexicana* and *Byrsonima crassifolia*). *Seed Science & Technology* 44, 1-9. <https://doi.org/10.15258/sst.2016.44.1.03>
- [22] Escobar-Álvarez, J. L., Ramírez-Reynoso, O., Cisneros-Saguilán, P., Gutiérrez-Dorado, R., Maldonado- Peralta, M. A., & Valenzuela-Lagarda, J. L. (2021) Viabilidad y germinación en semillas de maíz criollo del estado de Guerrero. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 8 (2). <https://doi.org/10.19136/era.a8n11.2963>
- [23] Estrada-Urbina, J., Cantú-López, E., Molina-Moreno, J., & Estrada-Gómez, J. (2023). Madurez fisiológica en semillas de maíz (*Zea mays L.*) mediante marcadores morfológicos y el contenido de humedad. *Agronomía Mesoamericana*, 34 (3), 53269. <https://dx.doi.org/10.15517/am.2023.53269>
- [24] López Camelo, A. (2003). Manual Para la Preparación y Venta de Frutas y Hortalizas. *Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación*. <https://www.fao.org/4/Y48935/y4893s04.htm>
- [25] Mancera-R., A. (2018). Determinación de la madurez fisiológica en semilla de maíz (*Zea mays L.*) mediante ganancia de peso seco y métodos alternos. *Agro Productividad*, 7(1). <https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/504>
- [26] Mendoza, M., Latournerie, L., Moreno, E., Castañón, G., Carrillo, J.C., León, C.D., & García, J.G. (2004). Cambios en la calidad de la semilla de maíz durante su desarrollo y maduración. *Agronomía Mesoamericana*, 15 (2), 155-160. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=43715204>

Mejoramiento de la tolerancia a estrés hídrico en maíz en un programa de mejoramiento público

Luciana Galizia^{1,2*}, Fátima Palifermo³, María Otegui^{1,2,4}

¹ INTA Estación Experimental Agropecuaria Pergamino. Av. Frondizi (Ruta 32) km 4,5, B2700, Pergamino, Buenos Aires, Argentina.

² Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. Av. San Martín 4453, C1417DSE, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.

³ Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires. Monteagudo 2772, B2700, Pergamino, Buenos Aires, Argentina.

⁴ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina.

*Autor para correspondencia / corresponding author, e-mail: galizia.luciana@inta.gob.ar

Maize drought tolerance improvement in a public breeding program

Abstract

World maize production is mainly carried out in rainfed systems in which the main limitation to grain yield is usually water availability. In maize, the anthesis-silking interval (ASI, in days) is proved to be a useful secondary trait as it is highly correlated with improved grain yield in drought-prone environments, has high heritability and can be fast and accurately measured in the field. The objective of this work was to characterize and select a set of inbred lines for their tolerance to water stress. To achieve this, 240 inbred lines of the INTA Pergamino Temperate Maize Breeding Program were grown in the field during the 2019-20 season at high planting density (16 pl.m²) in a randomized complete block design with 2 replicates. A subset of 50 inbreds was sown in the same site during the dry 2020-21 growing season. Inbreds were characterized for ASI and defensive traits, such as root and stalk lodging. High stand density promoted the expression of significant genotypic differences in ASI ($p < 0.05$, mean: 2.3 d, range: -3 to +9 d), root ($p < 0.05$, mean: 26.5%, range: 0 to 100%) and stalk lodging ($p < 0.05$, mean: 5.3%, range: 0 to 80%). Heritabilities values were 63, 51 and 64 for ASI, root and stalk lodging, respectively. In 2020-21, the 50 inbreds with the lowest ASI values (mean = 0.52), and with less than 20% and 5% root and stalk lodging, respectively were evaluated again, finding significant differences between inbreds (for ASI: $p < 0.05$, mean: 1.8, range: -3 to +6 days). Based on the data obtained in both years, a set of inbreds representative of the different heterotic groups of the breeding program was selected to make biparental crosses and develop new inbreds with shorter ASI, and therefore, with better performance under stressful conditions. For this, the inbreeding from the S0 generation and the evaluation of inbreds in hybrid combination will be carried out at high planting density (16 pl.m²). This selection method will allow the development of stress-tolerant germplasm.

Keywords: drought, yield stability, inbreds, resource use efficiency, secondary traits, high plant density.



Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /
Edited by:

María Gabriela Albán

Recibido /
Received:
01/05/2024

Aceptado /
Accepted:
30/06/2024

Publicado en línea /
Published online:
04/09/2024



Resumen

A nivel global, gran parte de la producción de maíz se realiza bajo condiciones de secano, en las que la principal limitante para el rendimiento suele ser la disponibilidad hídrica. En maíz, el intervalo entre la floración masculina o antesis y la floración femenina o *silking* (ASI, en días) ha resultado ser un rasgo secundario útil dada su alta correlación con un mejor rendimiento en grano en ambientes propensos al estrés hídrico, su alta heredabilidad y la posibilidad de medirlo de manera rápida y precisa a campo. El objetivo de este trabajo fue caracterizar y seleccionar un conjunto de líneas endocriadas por su tolerancia al estrés hídrico. Para ello, se evaluaron a campo 240 líneas pertenecientes al Programa de Mejoramiento de Maíz Templado del INTA, en Pergamino durante la campaña 2019/20 bajo condiciones de alta densidad de siembra (16 pl.m^{-2}) en un diseño de bloques completos al azar con 2 repeticiones. Un subconjunto de 50 líneas se evaluó nuevamente en el mismo sitio en la campaña 2020/21 (correspondiente a la fase La Niña del fenómeno climático El Niño Oscilación del Sur - ENOS). Las líneas se caracterizaron por ASI y rasgos agronómicos, como el porcentaje de vuelco y de quebrado. La alta densidad poblacional promovió la expresión de diferencias genotípicas significativas en ASI ($p < 0,05$, media: 2,3 días, rango: -3 a +9 días), porcentajes de vuelco ($p < 0,05$, media: 26,5%, rango: 0 a 100%) y quebrado ($p < 0,05$, media: 5,3%, rango: 0 a 80%). Los valores de heredabilidad fueron de 63, 51 y 64, para ASI, % de vuelco y % de quebrado, respectivamente. En 2020/21, se evaluaron las 50 líneas que el año previo había registrado los menores valores de ASI (media = 0,52), y que a su vez tuvieron porcentajes de vuelco menor al 20% y de quebrado de tallo menor al 5%, encontrando diferencias significativas entre líneas (para ASI: $p < 0,05$, media: 1,8, rango: -3 a +6 días). En base a los datos obtenidos en ambos años, se seleccionó un conjunto de líneas representativas de los diferentes grupos heteróticos del programa de mejoramiento para realizar cruzamientos biparentales y desarrollar nuevas líneas de menor ASI y, por ende, mejor comportamiento frente a situaciones de estrés. Para ello, la endocria a partir de la generación S0 y la evaluación de las líneas segregantes en combinación híbrida se realizarán bajo alta densidad de siembra (16 pl.m^{-2}). Este método de selección permitirá el desarrollo de gemoplasma tolerante al estrés.

Palabras clave: sequía, estabilidad del rendimiento, líneas endocriadas, eficiencia de uso de recursos, rasgos secundarios, alta densidad poblacional.

INTRODUCCIÓN

En el cultivo de maíz (*Zea mays* L.), el rendimiento en grano está principalmente determinado por el número de granos por planta [1, 2] que se fija durante el periodo crítico de 30 días alrededor de la fase de floración [3, 4]. El número de granos fijados está asociado a: (i) las tasas de crecimiento de la espiga y de la planta durante el periodo crítico [5]; (ii) la partición de biomasa a la espiga durante dicho periodo [6, 7]; (iii) la sincronía entre las floraciones masculina (antesis) y femenina (*silking*) [8], que determinan el intervalo antesis-*silking* (ASI, por su sigla en inglés); y (iv) la sincronía en la polinización de flores dentro de la espiga y entre espigas de una misma planta [9], que determina la prolificidad (espigas con granos por planta).



El maíz se cultiva en más de 200 millones de hectáreas a nivel global [10], lo que lo expone a una variedad de condiciones climáticas y a múltiples estreses bióticos y abióticos. Buena parte de esa superficie se encuentra bajo condiciones de sequía, en las que la principal limitante para el rendimiento es la disponibilidad hídrica [11]. El maíz es sensible al estrés hídrico durante la mayor parte de los estadios, pero su susceptibilidad es mayor en el periodo alrededor de la floración [12, 13]. Al ocurrir un déficit hídrico en la floración, se produce un retraso en el crecimiento de la espiga y, en consecuencia, en la aparición de los estigmas respecto a la panoja y a la emisión de polen [14, 15].

El uso de caracteres secundarios cuya varianza genética y heredabilidad son elevadas bajo estrés, resulta útil para aumentar la eficiencia de selección [16, 17, 18]. El éxito de la mejora del rendimiento mediante selección indirecta por un rasgo secundario dependerá de encontrar, al mismo tiempo, una alta correlación entre los efectos aditivos que determinan a ambos caracteres junto con una elevada heredabilidad y facilidad en su medición [19, 20]. El ASI es un rasgo ampliamente utilizado por mejoradores y fisiólogos para describir y seleccionar la tolerancia al estrés hídrico en el maíz [4, 21]. Trabajos realizados con maíces tropicales sometidos al estrés hídrico en floración muestran la alta correlación del rendimiento con el ASI y la prolificidad. Estos rasgos, a su vez, bajo condiciones de estrés severo, registraron valores de heredabilidad superiores a los del rendimiento en grano [17]. Además, el ASI, la prolificidad y la senescencia foliar, mostraron valores altos de heredabilidad en ambientes deficitarios en N, y su uso junto al rendimiento mejoró la eficiencia de selección en dichos ambientes [18].

El estrés por densidad poblacional puede considerarse un estrés crónico producto de la exposición en simultáneo a múltiples factores ambientales que reducen la captura o utilización de recursos de cada planta individual [22, 23]. Los factores ambientales que componen el estrés son difíciles de distinguir, pero se los puede considerar como desvíos de las condiciones óptimas de crecimiento, que limitan a que la planta alcance su potencial genético. La alta densidad poblacional es un estrés fácil de gestionar en su intensidad, adecuado para la evaluación de un gran número de genotipos, afecta a las plantas durante todo su ciclo y el rango de niveles de estrés que permiten discernir el comportamiento de los genotipos es amplio [24]. Los programas de mejoramiento comercial utilizan altas densidades poblacionales para evaluar el germoplasma, pero esa evaluación se realiza en fases avanzadas en el desarrollo de híbridos. Para aumentar la tasa de ganancia genética, la selección de un rasgo en la población segregante resulta superior frente a la selección en estados avanzados, cuando el número de genotipos selectos es acotado. Algunos autores proponen incorporar evaluaciones en alta densidad en etapas tempranas del desarrollo de líneas endocriadas, para mejorar la tolerancia al estrés [24].

El objetivo de este trabajo fue caracterizar y seleccionar, por su tolerancia al estrés hídrico, un conjunto de líneas endocriadas representativas del germoplasma disponible en el Programa de Mejoramiento de Maíz Templado del INTA. A partir de dicha selección se espera iniciar un programa de desarrollo de líneas endocriadas con mayor tolerancia al estrés, particularmente hídrico, a partir de la combinación de dos herramientas: la selección temprana bajo condiciones de alta densidad y el uso de un atributo secundario altamente correlacionado con la tolerancia al estrés hídrico, como el ASI. Para iniciar este programa, se caracterizaron 240 líneas endocriadas en condiciones



de estrés por alta densidad durante dos campañas. Luego se seleccionaron líneas que dieron origen a poblaciones segregantes producto de cruzamientos biparentales entre líneas de desempeño superior.

MATERIALES Y MÉTODOS

En la campaña agrícola 2019/2020 (año 1) se realizó la evaluación a campo de 240 líneas endocriadas pertenecientes al Programa de Mejoramiento de Maíz Templado del INTA. Estas líneas representan la variabilidad genética disponible en el programa. En la campaña 2020/2021 (año 2) se evaluaron 50 líneas seleccionadas a partir del análisis realizado en el año 1. Ambos experimentos se llevaron adelante en el campo experimental de la EEA Pergamino del INTA.

Las siembras se realizaron el 29 de octubre de 2019 y el 2 de noviembre de 2020 en un suelo argiudol típico serie Pergamino bajo siembra directa, con un diseño en bloques completos al azar con 2 repeticiones. La densidad de siembra utilizada fue de 16 pl.m⁻², el doble de la usualmente empleada. A la siembra se fertilizó con 200 kg.ha⁻¹ de urea y 150 kg.ha⁻¹ de mezcla arrancadora (7N 40P 5S) y los experimentos se condujeron en secano. La unidad experimental consistió en parcelas de 5 metros de largo por 2 surcos de ancho, distanciados a 0,7 m. En cada parcela se registraron las fechas en las que el 50 % de las plantas de los 4 m centrales de ambos surcos alcanzaron antesis y *silking*. A partir de la diferencia entre ambas fechas se estimó el ASI en días. Además, se cuantificaron características agronómicas como los porcentajes de plantas con vuelco de raíz y con quebrado de tallo. Los datos fueron estudiados mediante el análisis de la varianza. A partir de los cuadrados medios se estimaron los componentes de la varianza y, en base a estos, la heredabilidad.

RESULTADOS

El promedio de las temperaturas medias diarias durante el ciclo del cultivo fue de 22,1 °C y 21,7 °C para el año 1 y 2, respectivamente (Fig. 1), en tanto que las precipitaciones fueron de 665 mm y 398 mm cada año. Para el periodo crítico (*i.e.*, 30 días centrados en la floración), el promedio de temperaturas medias fue de 22,8 °C y 22,7 °C, respectivamente, y las precipitaciones fueron de 89 mm y 144 mm cada año. El año 1 se caracterizó por la ocurrencia de 3 días de golpe de calor (*i.e.*, días con temperatura máxima por encima de los 35 °C) en las semanas previas al inicio del periodo crítico (Fig. 1), lo cual ocasionó quemado foliar en unos pocos genotipos. El año 2 se caracterizó por escasas precipitaciones y fue caracterizado como correspondiente a la fase La Niña del fenómeno El Niño Oscilación del Sur (ENOS), que para la región del sitio experimental significa lluvias por debajo del promedio.

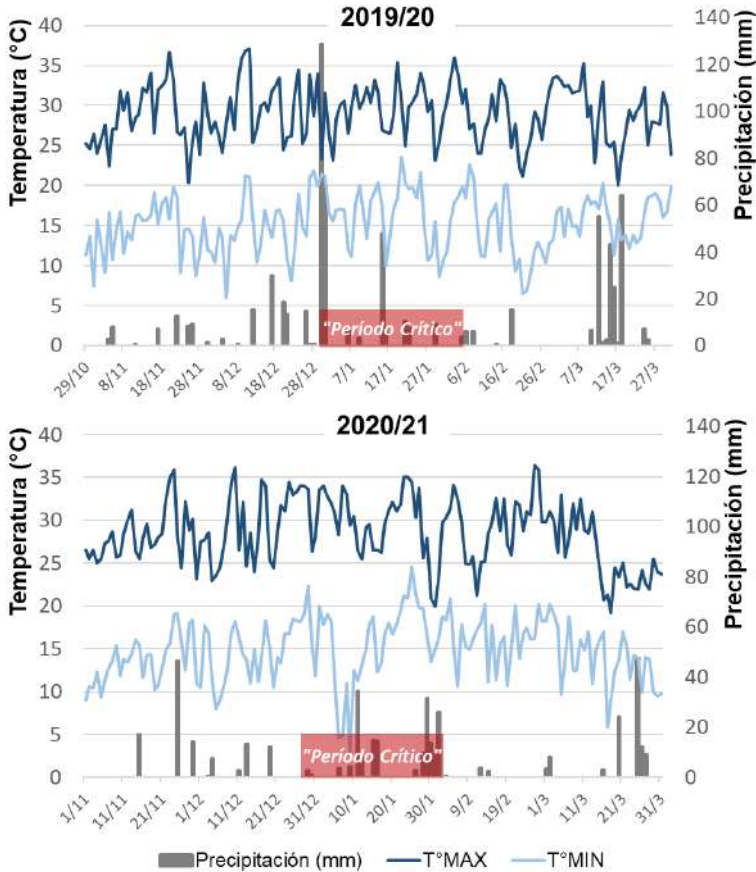


Figura 1. Condiciones climáticas exploradas en las campañas en que se realizó la caracterización del germoplasma. T°MAX: temperatura máxima diaria, T°MIN: temperatura mínima diaria. El rectángulo rojo indica el lapso en el que ocurrió el periodo crítico como promedio de todo el germoplasma evaluado en cada año.

En ambos años, los genotipos evaluados mostraron diferencias significativas en los valores de ASI, porcentaje de vuelco y porcentaje de quebrado ($p < 0,05$). El primer año se caracterizaron 240 líneas, con valores promedio de 2,3 días para el ASI (rango: -3 a 9 días); 26,5 % para vuelco (rango: 0 a 100 %); y 5,3 % para quebrado (rango: 0 a 80,1 %) (Fig. 2). Los valores de heredabilidad fueron de 0,63; 0,51 y 0,64, para ASI, porcentaje de vuelco y porcentaje de quebrado, respectivamente. A partir de estos datos, se seleccionaron las 50 líneas con desempeño superior para estos rasgos (*i.e.*, menores valores de ASI, y valores de porcentaje de vuelco y quebrado menores al 20 % y al 5 %, respectivamente). El valor medio de ASI en el año 1 de las 50 líneas selectas fue de 0,52 días (Fig. 3). En el año 2, los valores promedio observados fueron 1,8 días para el ASI (rango: -3 a 6 días); 19,6% para vuelco (rango: 0 a 65 %); y 45,9 % para quebrado (rango: 0 a 100 %). Esta información permitió construir un *ranking* de las líneas de acuerdo con el desempeño que tuvieron para estas características.



El ranking de genotipos permitió identificar líneas de buen desempeño dentro de cada grupo heterótico u origen genético, y así dar inicio al desarrollo de nuevas líneas con comportamiento superior. En la campaña 2021/2022 se realizaron 8 cruza biparentales. En 2022/2023, a partir de la autofecundación de individuos F_1 de cada cruza, se originó la semilla S_0 (F_2). En 2023/2024 se sembraron las poblaciones S_0 en condiciones de alta densidad para continuar con el proceso de endocría. En las campañas próximas se espera continuar con la endocría bajo siembras de alta densidad. A partir de la generación S_2 se iniciarán los cruzamientos por probadores de los diferentes grupos heteróticos, para iniciar la selección por aptitud combinatoria, tanto en condiciones de densidad de siembra normal como de alta densidad.

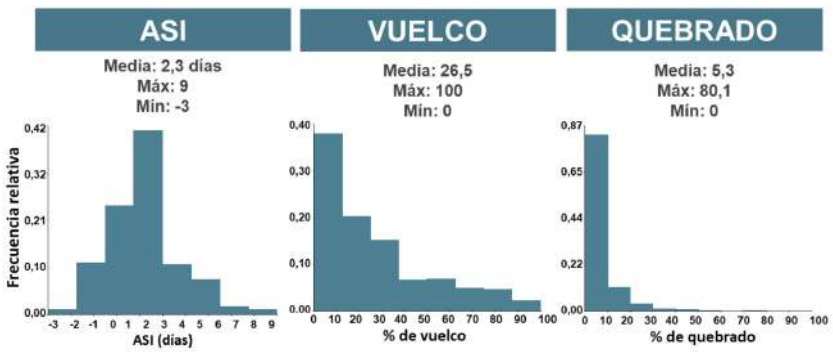


Figura 2. Diagramas de frecuencias relativas observadas en 240 líneas evaluadas en el año 1 para los caracteres ASI, porcentaje de vuelco y porcentaje de quebrado.

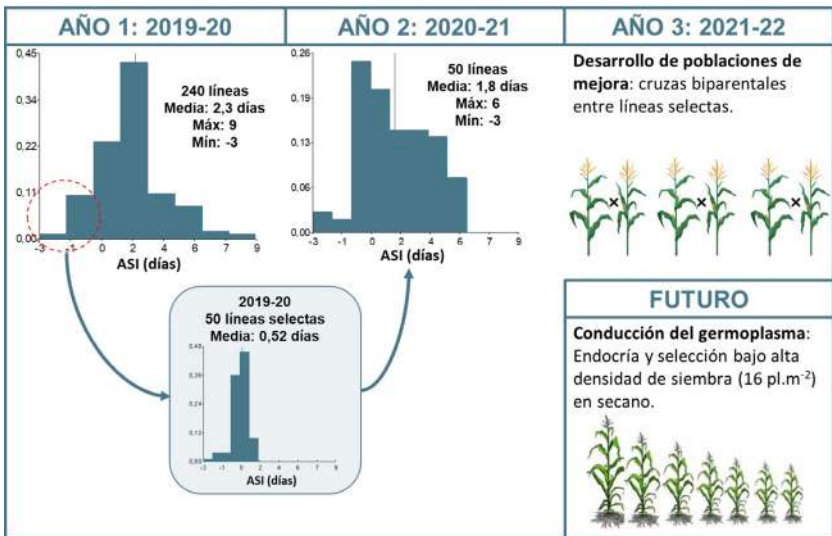


Figura 3. Esquema de mejoramiento propuesto.



DISCUSIÓN

El proceso de mejoramiento para la obtención de híbridos requiere de numerosas generaciones de endocría. A lo largo de más de 100 años de historia en el desarrollo de híbridos de maíz [25, 26, 27] ocurrió una selección indirecta que produjo una reducción del ASI [28, 29, 30]. Aun así, bajo condiciones de estrés, se encontraron diferencias en el ASI de los materiales evaluados, indicando que existe aún variabilidad genética para este rasgo, al menos para el germoplasma del Programa de Mejoramiento de Maíz Templado del INTA. Al tratarse de un programa de mejoramiento público, en el cual: (i) la intensidad de selección no ha sido tan elevada como en los programas comerciales, (ii) la variabilidad genética disponible es mucho mayor, y (iii) se incorporan nuevas fuentes de variabilidad genética frecuentemente, es posible que pueda haber una mayor respuesta a la selección que aquella que podría obtenerse en programas comerciales.

De acuerdo con nuestro conocimiento, los programas de mejoramiento comercial realizan selección en altas densidades de siembra (11–16 pl.m²), a través de la evaluación del comportamiento de combinaciones híbridas. Esta selección ocurre generalmente en estados avanzados y sin someter a estrés a las líneas en desarrollo *per se*. Trabajos previos han demostrado que las líneas endocriadas podrían resultar incluso más susceptibles al estrés hídrico que los híbridos, dada la mejor adaptación que les confiere, a los segundos, la heterosis que expresan [31, 32, 33]. En este trabajo proponemos iniciar la selección en condiciones de alta densidad desde el desarrollo de las líneas, conduciendo el vivero de cría en alta densidad.

Al realizar la endocría en estas condiciones, en primer lugar se asegura la ocurrencia de estrés, sin necesidad de realizar evaluaciones fuera del ambiente objetivo del programa de mejora y/o con experimentos manipulativos que impidan la infiltración de las precipitaciones, difíciles de conducir en grandes extensiones a campo. Segundo, indirectamente, a través del proceso de autofecundación, se seleccionan aquellos individuos con menor ASI bajo estrés. En los individuos que presenten mayor susceptibilidad al estrés, la floración femenina tendrá un desfase respecto a la antesis que no permitirá la autofecundación exitosa, aumentando la intensidad de selección por este rasgo.

A su vez, no debe perderse de vista el rendimiento potencial, por lo cual, se propone realizar los ensayos de *topcross* (i.e., evaluación en combinación híbrida de las líneas en desarrollo para su selección por habilidad combinatoria) no solo bajo condiciones de alta densidad, sino también bajo las densidades de siembra habitualmente empleadas y en múltiples localidades [34]. En aquellos programas de mejoramiento que han integrado el uso de haploides duplicados para el desarrollo de líneas, se propone el fenotipado de estos rasgos en el primer año de evaluación. Finalmente, en programas que además integren selección genómica, es importante incorporar a los modelos de selección este tipo de rasgos de alta heredabilidad y fuerte correlación con la estabilidad del rendimiento.

CONCLUSIONES

La integración de conocimientos de diferentes disciplinas como la genética cuantitativa, la ecofisiología, la estadística, la genética molecular, entre otras, continúa siendo crítica



para el desarrollo de nuevo germoplasma con mayor rendimiento y estabilidad. Este trabajo ha permitido identificar fuentes de variación útiles para el desarrollo de germoplasma con mayor tolerancia al estrés abiótico, en particular hídrico. A su vez, utilizando el esquema de selección aquí propuesto (Fig. 3) se ha logrado establecer un programa de mejoramiento de la tolerancia al estrés que permitirá el desarrollo de germoplasma de maíz templado adaptado a la región pampeana argentina.

En los años siguientes, empleando el conjunto de 240 líneas aquí evaluadas, continuarán los estudios de las bases genéticas de rasgos asociados con la determinación del rendimiento y su estabilidad. Los caracteres a estudiar serán: el número de flores diferenciadas en la floración, la velocidad de emisión de estigmas, el número de hileras, la relación entre el número de flores diferenciadas y el número de granos fijados, entre otros. Además de profundizar en el entendimiento de los procesos fisiológicos relacionados con la tolerancia al estrés, esto permitirá continuar con el desarrollo de germoplasma y el enriquecimiento de poblaciones de mejora con alelos que incrementen su adaptación a situaciones de estrés. A futuro, se espera poder establecer un programa de selección recurrente que pueda proveer fuentes de variación valiosas a los programas de mejoramiento de maíz de Argentina.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por los proyectos de INTA cartera 2019: I-128 y cartera 2023: I110 e I102, y por el convenio de vinculación tecnológica INTA Semilleros. Las autoras desean agradecer a Macarena Mauer, Leonardo Magro, Mauro Nazar, Oscar Ale y Renzo Rodríguez por la ayuda técnica para la implantación y mantenimiento de los experimentos.

Agradecemos también a la Red Latinoamericana de Maíz y al proyecto Tech Maíz del Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED) por promover el intercambio y la gestión del conocimiento en la región.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

María Otegui y Luciana Galizia concibieron la investigación y desarrollaron la metodología. Luciana Galizia y Fátima Palifermo realizaron el trabajo de campo. Luciana Galizia realizó el análisis de los datos. Luciana Galizia y María Otegui redactaron el manuscrito.

CONFLICTO DE INTERÉS

Las autoras declaran que no existe ningún conflicto de interés en la presente investigación.

REFERENCIAS

- [1] Cirilo, A.G. y Andrade, F.H. (1994). Sowing date and maize productivity: II. Kernel number determination. *Crop Science*, 34, 1044-1046. doi: <https://doi.org/10.2135/cropsci1994.0011183X003400040038x>
- [2] Otegui, M.E. (1995). Prolificacy and grain yield components in modern Argentinean maize hybrids. *Maydica*, 40, 371-376. https://www.researchgate.net/publication/261473724_Prolificacy_and_Grain_Yield_Components_in_Modern_Argentinian_Maize_Hybrids
- [3] Fischer K.S. y Palmer, A.F.E. (1984). Tropical Maize. In: P.R. Goldsworthy y N.M. Fisher (Eds.), *The physiology of tropical field crops* (pp. 213-248). J. Wiley & Sons Ltd. https://books.google.com.ec/books/about/The_Physiology_of_Tropical_Field_Crops.html?id=4ftwAAAAMAAJ&redir_esc=y
- [4] Borrás, L. y Vitantonio-Mazzini, L.N. (2018). Maize reproductive development and kernel set under limited plant growth environments. *Journal of Experimental Botany*, 69(13), 3235–3243. doi: <https://doi.org/10.1093/jxb/erx452>
- [5] Andrade, F.H., Vega, C., Uhart, S., Cirilo, A.G., Cantarero, M. y Valentinuz, O. (1999). Kernel number determination in maize. *Crop Science*, 39, 453-459. <https://www.semanticscholar.org/paper/Kernel-Number-Determination-in-Maize-Andrade-Vega/d3c00d4a8b827b0b52826600948d1c61808fa354>
- [6] Pagano, E. y Maddonni, G.A. (2007). Intra-specific competition in maize: early established hierarchies differ in plant growth and biomass partitioning to the ear around silking. *Field Crops Research*, 101, 306-320. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2006.12.007>
- [7] Borrás, L., Westgate, M.E., Astini, J.P. y Echarte, L. (2007). Coupling time to silking with plant growth rate in maize. *Field Crops Research*, 102, 73-85. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2007.02.003>
- [8] Bolaños, J. y Edmeades, G.O. (1993). Eight cycles of selection for drought tolerance in lowland tropical maize. II. Responses in reproductive behavior. *Field Crops Research*, 31, 253-268. doi: [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(93\)90065-U](https://doi.org/10.1016/0378-4290(93)90065-U)
- [9] Cárcova, J., Uribelarrea, M., Borrás, L., Otegui, M. E. y Westgate, M.E. (2000). Synchronous Pollination within and between Ears Improves Kernel Set in Maize. *Crop Science*, 40, 1056-1061. doi: <https://doi.org/10.2135/cropsci2000.4041056x>
- [10] FAO. (2024). *Food and Agriculture Organization of the United Nations – Statistics Division*. FAOSTAT. <http://fao.org/faostat/es/>
- [11] Lobell, D.B., Cassman, K.G. y Field, C.B. (2009). Crop yield gaps: their importance, magnitudes, and causes. *Annual Review of Environment and Resources*, 34, 179–204. doi: <https://doi.org/10.1146/annurev.environ.041008.093740>
- [12] Hall, A.J., Lemcoff, J.H. y Trapani, N. (1981). Water stress before and during flowering in maize and its effects on yield, its components, and their determinants. *Maydica*, 26, 19–38. <https://www.semanticscholar.org/paper/Water-stress-before-and-during-flowering-in-maize-Hall-Lemcoff/9e1e0ebb66abaa7705a52a7ab485cdf201406aa>
- [13] Grant, R.F., Jackson, B.S., Kinyry, J.R. y Arkin, G.F. (1989). Water deficit timing effects on yield components in maize. *Agronomy Journal*, 81, 61–65. doi: <https://doi.org/10.2134/agronj1989.00021962008100010011x>
- [14] Herrero, M.P. y Johnson, R.R. (1981). Drought stress and its effects on maize reproductive systems. *Crop Science*, 21(1), 105–110. doi: <https://doi.org/10.2135/cropsci1981.0011183X002100010029x>
- [15] Otegui, M.E., Andrade, F.H. y Suero, E.E. (1995). Growth, water use, and kernel abortion of maize subjected to drought at silking. *Field Crops Research*, 40, 87-94. doi: [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(94\)00093-R](https://doi.org/10.1016/0378-4290(94)00093-R)
- [16] Ludlow, M.M. y Muchow, R.C. (1990). A critical evaluation of traits for improving crop yields in water-limited environments. *Advances in Agronomy*, 43, 107-153. doi: [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60477-0](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60477-0)
- [17] Bolaños, J. y Edmeades, G.O. (1996). The importance of the anthesis silking interval in breeding for drought tolerance in tropical maize. *Field Crops Research*, 48, 65-80. doi: [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(96\)00036-6](https://doi.org/10.1016/0378-4290(96)00036-6)
- [18] Bänziger, M. y Lafitte, H.R. (1997). Breeding tropical maize for low N environments. II. The values of secondary traits for improving selection gains under low N. *Crop Science*, 37, 1110–1117.
- [19] Blum, A. (1988). *Plant Breeding for Stress Environments*. CRC Press Inc. doi: <https://doi.org/10.1201/9781351075718>



- [20] Falconer, D.S. y Mackay, T.F.C. (1996). *Introduction to quantitative genetics*. 4th ed. Pearson Education Limited. <https://archive.org/details/IntroductionToQuantitativeGenetics/mode/2up>
- [21] Rebolloza-Hernández, H., Cervantes-Adame, Y.F., Broa-Rojas, E., Bahena-Delgado, G. y Olvera-Velona, A. (2020). Fenotipo y selección de líneas S₁ segregantes de maíz tolerantes a estrés hídrico. *Biotecnia XXII*, (3), 20-28. doi: <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v22i3.1130>
- [22] Tollenaar, M. y Lee, E.A. (2002). Yield potential yield, yield stability and stress tolerance in maize. *Field Crops Research*, 75, 161–170. doi: [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(02\)00024-2](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(02)00024-2)
- [23] Mansfield, B.D. y Mumm, R.H. (2014). Survey of Plant Density Tolerance in U.S. Maize Germplasm. *Crop Science*, 54, 157-173. doi: <https://doi.org/10.2135/cropsci2013.04.0252>
- [24] Lee, E. y Tollenaar, M. (2007). Physiological basis of successful breeding strategies for maize grain yield. *Crop Science*, 47, S202-S215. doi: <https://doi.org/10.2135/cropsci2007.04.0010IPBS>
- [25] Shull, G.H. (1908). The composition of a field of maize. *Journal of Heredity*, 4, 296–301. doi: <https://doi.org/10.1093/jhered/os-4.1.296>
- [26] Shull, G.H. (1909). A pureline method of corn breeding. *Journal of Heredity*, 5, 51–59. doi: <https://doi.org/10.1093/jhered/os-5.1.51>
- [27] Andorf, C., Beavis, W.D., Hufford, M., Smith, S., Suza, W.P., Wang, K., Woodhouse, M., Yu, J. y Lübberstedt, T. (2019). Technological advances in maize breeding: past, present and future. *Theoretical Applied Genetics*, 132, 817–849. doi: <https://doi.org/10.1007/s00122-019-03306-3>
- [28] Campos, H., Cooper, M., Edmeades, G. O., Löffler, C., Schussler, J. R., Ibañez, M. (2006). Changes in drought tolerance in maize associated with fifty years of breeding for yield in the U.S. Corn Belt. *Maydica*, 51: 369–381. https://www.researchgate.net/publication/271517539_Changes_in_drought_tolerance_in_maize_associated_with_fifty_years_of_breeding_for_yield_in_the_US_Corn_Belt
- [29] Welcker, C., Spencer, N. A., Turc, O., Granato, I., Chapuis, R., Madur, D., Beauchene, K., Gouesnard, B., Draye, X., Palaffre, C., Lorgeou, J., Melkior, S., Guillaume, C., Presterl, T., Murigneux, A., Wissler, R. J., Millet, E. J., van Eeuwijk, F., Charcosset, A. y Tardieu, F. (2022). Physiological adaptive traits are a potential allele reservoir for maize genetic progress under challenging conditions. *Nature Communications*, 13, 3225. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-30872-w>
- [30] dos Santos, C. L., Miguez, F. E., King, K. A., Ruiz, A., Sciarresi, C., Baum, M. E., Danalatos, G. J. N., Stallman, M., Wiley, E., Pico, L. O., Thies, A., Puntel, L. A., Topp, C. N., Trifunovic, S., Eudy, D., Mensah, C., Edwards, J. W., Schnable, P. S., Lamkey, K. R., Vyn, T.J. y Archontoulis, S. V. (2023). Accelerated leaf appearance and flowering in maize after four decades of commercial breeding. *Crop Science*, 63, 2750–2762. <https://doi.org/10.1002/csc2.21044>
- [31] Echarte, L. y Tollenaar, M. (2006). Kernel set in maize hybrids and their inbred lines exposed to stress. *Crop Science*, 46, 870-878. doi: <https://doi.org/10.2135/cropsci2005.0204>
- [32] Liu, W. y Tollenaar, M. (2009). Response of yield heterosis to increasing plant density in maize. *Crop Science*, 49, 1807-1816. doi: <https://doi.org/10.2135/cropsci2008.07.0422>
- [33] Araus, J.L., Sánchez, C. y Cabrera-Bosquet, L. (2010). Is heterosis in maize mediated through better water use? *New Phytologist*, 187, 392-406. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2010.03276.x>
- [34] Cooper, M., Messina, C., Podlich, D., Radu Totir, L., Baumgarten, A., Hausmann, N.J., Wright, D. y Graham, G. (2014). Predicting the future of plant breeding: complementing empirical evaluation with genetic prediction. *Crop and Pasture Science*, 65(4), 11-336. doi: <https://doi.org/10.1071/CP14007>

Diagnóstico del complejo mancha de asfalto en el cultivo de maíz en el Altiplano Central de Guatemala

Astrid J. Racancoj Coyoy^{1*}, Glenda E. Pérez García¹, Johnny Patal²

¹ Programa de Protección Vegetal, Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícolas (ICTA), Guatemala.

² Programa de Socioeconomía Rural, Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícolas (ICTA), Guatemala.

* Autor correspondiente, email: astrid.racancoj@icta.gob.gt

Prospection of Corn Tar Spot Complex at Central Highlands of Guatemala

Resumen

El complejo mancha de asfalto (CMA) es una enfermedad del maíz asociada a la presencia de tres hongos fitopatógenos: los dos primeros son *Phyllachora maydis* y *Monographella maydis*, y el tercer patógeno es el hiperparásito de los estromas de *P. maydis* conocido como *Coniothyrium phyllachorae*. Esta enfermedad afecta el rendimiento del cultivo, y en ocasiones puede generar una pérdida total. El CMA ha predominado en zonas del trópico, caracterizadas por presentar altas temperaturas y alta humedad relativa. Sin embargo, a partir del 2015, se han generado reportes en Estados Unidos, México y Ecuador respecto a la presencia de *P. maydis* en zonas productoras de maíz de templadas a frías (≤ 15 °C). En este contexto, con la finalidad de determinar la presencia de los patógenos asociados al CMA en zonas de clima templado de Guatemala, durante el segundo semestre del 2022, se visitaron 48 parcelas de maíz en el departamento de Chimaltenango. En cada parcela se evaluó la incidencia y el grado de infección de los síntomas asociados al CMA. En 13 municipios de Chimaltenango se detectó la presencia de estromas de *P. maydis* (manchas negras brillantes, dispersas sobre la hoja), así como la formación de "ojo de pescado". La incidencia osciló entre 10 y 100 %, con un grado de infección entre moderado y fuerte, según la escala utilizada. Se confirmó que al menos uno de los patógenos asociados al CMA (*P. maydis*) está presente en las zonas de producción de maíz del altiplano central de Guatemala.

Palabras clave: *Phyllachora maydis*, *Monographella maydis*, grado de infección, temperatura.

Abstract

Tar spot complex (TSC) is a corn disease associated with the presence of three fungi: the first two pathogens being *Phyllachora maydis* and *Monographella maydis*, and the hyperparasite of the stromas of *P. maydis* known as *Coniothyrium phyllachorae*. This disease affects the yield of the crop, which can sometimes lead to total loss. It has predominated in tropical areas, characterized by high temperatures and high relative humidity. However, since 2015, there have been reports in the United States, Mexico, and Ecuador of the presence of *P. maydis* in temperate to cold corn production areas. In this context, to determine the presence of pathogens associated with TSC in temperate climate areas, 48 corn fields in the department of Chimaltenango were evaluated during the second half of 2022. In each field, the incidence and degree of infection were evaluated. In 13 locations of Chimaltenango, the presence of *P. maydis* stromas



Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /
Edited by:

María Gabriela Albán

Recibido /
Received:
31/05/2024

Aceptado /
Accepted:
05/09/2024

Publicado en línea /
Published online:
10/12/2024



(shiny black spots scattered on the leaf) was detected, as well as the formation of “fish eyes”. The incidence ranged between 10 and 100 %, with a degree of infection between moderate and strong, according to the scale used. It was confirmed that at least one of the pathogens associated with the TSC, *P. maydis*, is present in the corn production areas of the central highlands of Guatemala.

Key words: *Phyllachora maydis*, *Monographella maydis*, infection degree, temperature

INTRODUCCIÓN

El maíz (*Zea mays* L.) es uno de los granos más importantes en diferentes sectores económicos a nivel mundial [1, 2]. “En Guatemala, forma parte de la dieta básica y está profundamente arraigado en la cultura desde épocas ancestrales” [2]. Para muchas familias del área rural, es una fuente de recurso económico que garantiza su seguridad alimentaria y supervivencia [1, 3]. El cultivo se ha establecido en diferentes condiciones agroecológicas, asociadas con la temperatura, la humedad relativa, la precipitación y la altitud (de cero a 3,100 m s. n. m.) [2]. Así, como los genotipos de maíz se han adaptado a la diversidad de ambientes, desde condiciones tropicales, subtropicales y templadas, los patógenos que se asocian al cultivo también se han adaptado a las diferentes condiciones.

El complejo mancha de asfalto (CMA) es una de las enfermedades que afecta al cultivo y se atribuye a un complejo patológico producido por los hongos *Phyllachora maydis*, *Monographella maydis* (sin. *Microdochium maydis*) y *Coniothyrium phyllachorae* Maubl., asociado como hiperparásito de los estromas de *P. maydis*. La infección inicia con *P. maydis*, que genera los primeros síntomas visibles en las hojas de maíz: manchas negras elevadas y brillosas dispersas en la superficie de la hoja. Estas manchas son de forma ovalada a circular de 0.5-2.0 mm de diámetro, denominadas estromas. Al colonizar *M. maydis* se forma una lesión denominada ojo de pescado [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10]. La enfermedad avanza de las hojas inferiores a las superiores, cubriendo la totalidad de la planta [9]. *P. maydis* es un ascomicete, su reproducción sexual genera ascosporas y de manera asexual genera conidios. Las ascosporas se forman dentro de las ascas de pared simple, dentro de un solo peritecio cubierto por estromas donde se producen ocho ascosporas ovaladas de 10 a 14 μm \times 5.5 a 8 μm por asca [6, 11, 12]. Cuando los sistemas de producción cuentan con las condiciones apropiadas para la diseminación y el desarrollo de la infección de los agentes causales del CMA y estas ocurren antes del período de floración en materiales susceptibles, se puede perder hasta el 100 % de la producción [13, 14]. Según el modelo de predicción desarrollado en Estados Unidos [14, 15], se demuestra que una pérdida del 1 % en la producción de maíz causada por el CMA podría generar una reducción en la producción de 1.5 millones de toneladas métricas del grano, por un valor aproximado de 231.6 millones de dólares. Las pérdidas de producción afectarían tanto a industrias asociadas al maíz en los Estados Unidos, como a la seguridad alimentaria de varios países.

En Guatemala, la presencia del CMA es una de las problemáticas de mayor importancia en la producción en el oriente y norte del país, ya que ha causado hasta el 80 % de las pérdidas en el cultivo, con mayor efecto cuando las infecciones severas se originan antes



del período de floración [16]. En la Franja Transversal del Norte, Alta Verapaz, el CMA se ha presentado con una incidencia mayor al 50 %, y un grado de infección de las lesiones de moderadas a fuertes y de plantas totalmente muertas [17]. Debido a que *P. maydis* ha coevolucionado con el maíz durante cientos de años [15], es importante documentar la propagación y el establecimiento de los patógenos, particularmente cuando es nuevo para una determinada región [2, 3]. Por ello, durante el segundo semestre del 2022, se realizó el diagnóstico del CMA en zonas de producción del altiplano central de Guatemala, para determinar la presencia de los patógenos asociados al complejo, comprender la distribución de la enfermedad y enriquecer el banco de información sobre los principales patógenos del cultivo de maíz.

MATERIALES Y MÉTODOS

El diagnóstico del CMA se desarrolló bajo un diseño de investigación no experimental, descriptivo, de carácter observacional. A partir de septiembre del 2022, se visitaron 48 parcelas de maíz que estaban en floración y formación de grano en 13 municipios de Chimaltenango, departamento ubicado en el altiplano central de Guatemala, siendo estos: Tecpán, Patzicía, San Martín Jilotepeque, Pochuta, El Tejar, San Andrés Itzapa, San Juan Comalapa, Chimaltenango, San José Poaquil, Zaragoza, Patzún, Parramos y Acatenango. Dentro de las parcelas, se identificaron cinco cuadrantes y se evaluaron 18 plantas en cada uno. Se verificó la presencia o ausencia de manchas negras brillosas en las hojas según el estrato de la planta, y se determinó el grado de infección de manera visual (fenotipado), de acuerdo con la escala diagramática de severidad del CMA que comprende valores de 0 a 4 (Tabla 1, Fig 1).

Para la verificación de la presencia de los patógenos asociados con el CMA, dentro de los cuadrantes identificados, se seleccionaron muestras de hojas con manchas negras elevadas-brillosas (estromas) y de hojas con la formación del ojo de pescado. La región estromal de las lesiones foliares se cortaron longitudinalmente, se colocaron en portaobjetos y se observaron en el microscopio a 10X, 40X y 100X. Así mismo, se evaluó la comunidad fúngica de las lesiones, y para ello, se seleccionaron estromas y se maceraron con nitrógeno líquido. Se utilizó el kit: Quick-DNA™ Fungal/Bacterial Miniprep Kit, Zymo Research® para la extracción de ADN. Las muestras procesadas se trasladaron al laboratorio de protección vegetal de la Universidad del Valle de Guatemala, para su envío a secuenciación.

TABLA 1. Escala del grado de infección del complejo mancha de asfalto (CMA) [18]

Valor	Grado de infección	Descripción
0	Planta sana	No se presentan lesiones (manchas negras) en las hojas.
1	Infección leve	Unas pocas lesiones diseminadas en las hojas inferiores.
2	Infección moderada	Lesiones abundantes, la mayoría sobre las hojas inferiores y unas pocas en las hojas superiores.
3	Infección fuerte	Lesiones de manchas negras abundantes sobre las hojas inferiores e intermedias moviéndose hacia las hojas superiores.
4	Infección muy fuerte	Abundantes lesiones sobre todas las hojas (alcanzan la hoja bandera). Las plantas pueden morir prematuramente.

Tomado de: Cortez, M., Castellanos, L., & Aldana, A. (2010). [18]

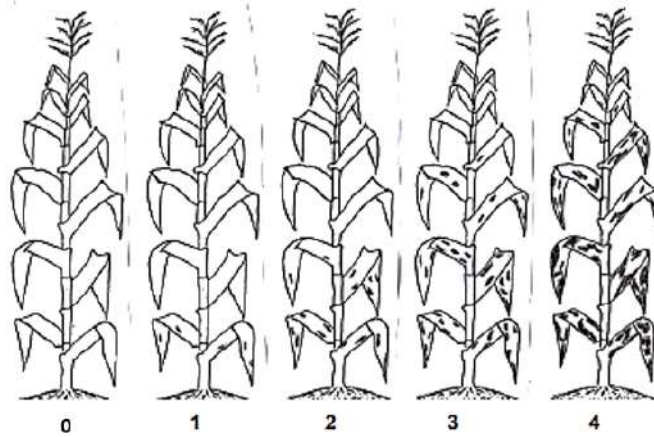


FIGURA 1. Escala diagramática del complejo mancha de asfalto.

Tomado de: Cortez, M., Castellanos, L., & Aldana, A. (2010). [18]

Imagen utilizada con permiso de la Escuela Nacional de Agricultura "Roberto Quiñonez" (ENA).

RESULTADOS

En las 48 zonas de producción de maíz en Chimaltenango se identificaron síntomas asociados al CMA: presencia de manchas negras brillantes dispersas en las hojas, así como la formación del ojo de pescado (Fig. 2). Respecto al grado de infección, 36 parcelas presentaron una infección entre moderada y fuerte según la escala utilizada, ya que los estromas alcanzaron la hoja bandera (Fig. 3). Al realizar la caracterización microscópica de los cortes de la región estromal de las manchas negras brillantes, se observó que las ocho ascosporas ovaladas estaban dentro de las ascas en un solo peritecio, característica de *P. maydis* [12] (Fig. 4). Por otro lado, de las muestras que se enviaron a secuenciación, se confirmó la presencia de *P. maydis* de las procedentes de Parramos y Patzún, al mostrar una similitud del 98.83 % y 98.57 %, respectivamente (Tabla 2).

La incidencia de los síntomas iniciales asociados al CMA difiere según el municipio evaluado. Seis municipios que se encuentran entre 2,067 a 2,282 m.s.n.m presentaron el 100 % de incidencia de las manchas negras brillantes, con un grado de infección entre 3 y 4 siendo estos: Chimaltenango, San José Poaquil, Zaragoza, Patzún, Parramos y Acatenango. La menor incidencia se presentó en áreas de producción de Tecpán (10 %) en las parcelas que se encontraban a 2,388 m.s.n.m. A través de la evaluación de la incidencia y el grado de infección, se estableció el mapa de interpolación del CMA en Chimaltenango (Fig. 5).

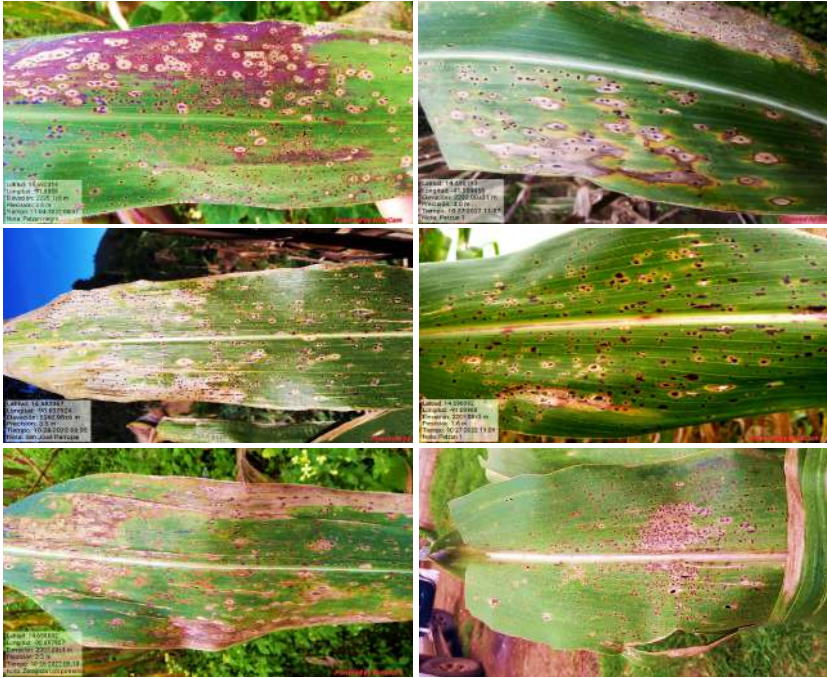


FIGURA 2. Formación de ojo de pescado y presencia de manchas negras brillantes en hojas de las plantas de maíz en parcelas de Patzún, Parramos, Zaragoza y Chimaltenango, Guatemala, 2022.
Créditos de las fotos: Astrid J. Racancoj

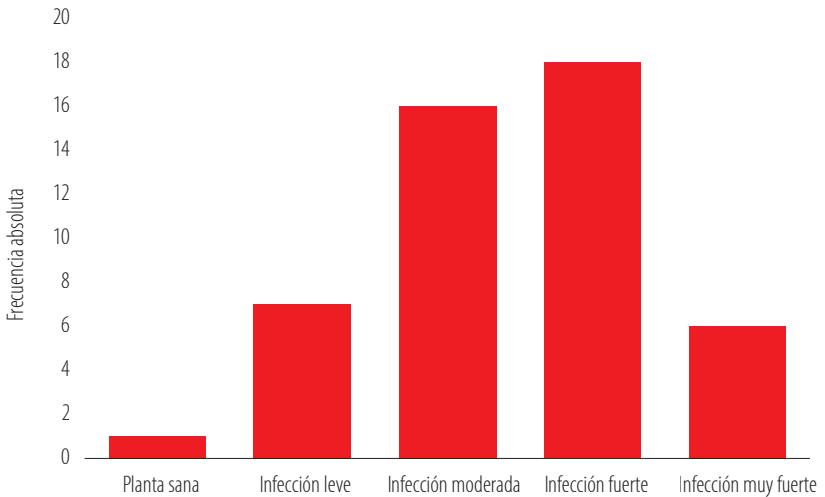


FIGURA 3. Histograma del grado de infección de síntomas asociados al complejo mancha de asfalto en trece municipios de Chimaltenango. Tomado de: elaboración propia.

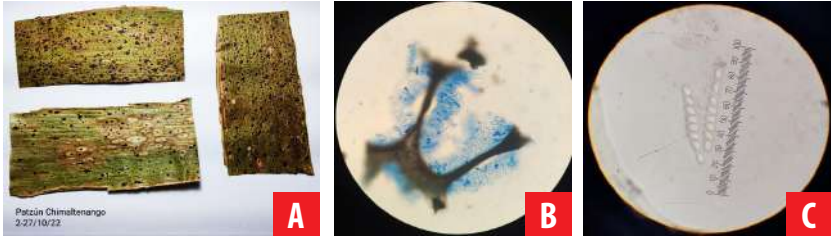


FIGURA 4. Verificación de la presencia de *P. maydis* en las manchas negras brillantes de las muestras de hojas de maíz de Patzún, Chimaltenango, Guatemala. **A** Porción de hoja de maíz con presencia de manchas negras brillantes y síntoma de ojo de pescado, **B** Corte longitudinal de la región estromal, **C** Presencia de las ocho ascosporas dentro del asca, ápice redondeado, característica de *P. maydis*. Créditos de las fotos: Astrid Racancoj.

TABLA 2. Comunidad fúngica presente en los estromas de las muestras enviadas a secuenciación, recolectadas durante el diagnóstico del CMA en Chimaltenango, Guatemala, 2022.

Localidad	Resultado de secuenciación ITS
Chimaltenango	<i>Phytophthora</i> sp. Similitud: 93.44 %, cobertura 98 %; <i>Cryptococcus</i> sp. similitud: 97.66 %, cobertura 96 %, <i>Epicoccum sorghium</i> , similitud: 100 %, cobertura 100 %
El Tejar	<i>Pyriculariassp.</i> Similitud: 100 %, cobertura 93 %
Parramos	<i>Phyllachora maydis</i> , similitud: 98.83 %, cobertura 54 %; <i>Phaeoseptoriella zea</i> , similitud: 74.74 %, cobertura 91 %
Patzcía	<i>Cercospora</i> sp. Similitud: 83.66 %, cobertura 90 %
Patzún	<i>Phyllachora maydis</i> , similitud: 93.13 %, cobertura 80 %; <i>Phytophthium</i> sp. Similitud: 98.49 %, cobertura 38 %; <i>Epicoccum sorghium</i> , similitud: 99.41 %, cobertura 45 %
Pochuta	<i>Phaeoseptoriella zea</i> , similitud: 84.35 %, cobertura 92 %; <i>Epicoccum sorghium</i> , similitud: 99.78 %, cobertura 100 %
San Andrés Itzapa	<i>Alternaria alternata</i> , similitud: 86.28 %, cobertura 45 %
Tecpán Guatemala	<i>Bipolaris arylae</i> , similitud: 79.10 %, cobertura 55 %
Zaragoza	<i>Ectophoma pomi</i> , similitud: 74.74 %, cobertura 91 %; <i>Alternaria tenuissima</i> , similitud: 79.45 %, cobertura 52 %

Nota: la cobertura hace referencia a la similitud de la secuencia del hongo aislado con la base de datos de NCBI. Los resultados se obtuvieron mediante la Universidad del Valle de Guatemala. Tomado de: elaboración propia

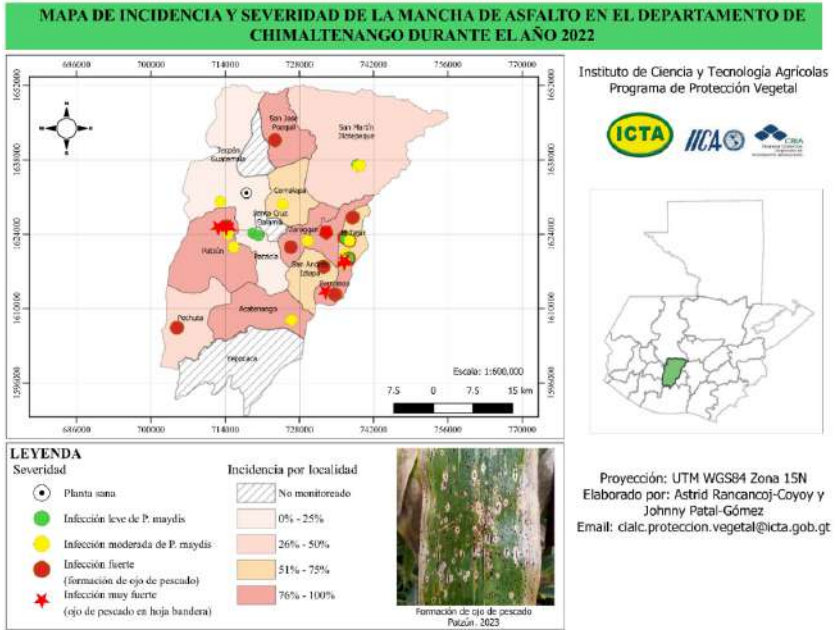


FIGURA 5. Mapa de incidencia y grado de infección de síntomas asociados al complejo mancha de asfalto en Chimaltenango, Guatemala, 2022. Crédito de mapa: Johnny Patal.

DISCUSIÓN

La verificación de al menos uno de los patógenos asociados al CMA en los municipios de Chimaltenango corrobora que esta enfermedad está colonizando zonas de producción del altiplano central de Guatemala. En Chimaltenango, de julio a octubre del 2022, la temperatura mínima fue de 4.4 °C y máxima de 28.6 °C. La temperatura media máxima osciló entre 19.6 y 22.6 °C, con registros de humedad relativa (HR) de 78 a 94 %. Algunos autores [2, 6, 7, 8] hacen referencia a que el complejo se está convirtiendo en una enfermedad emergente en regiones maiceras no tropicales con climas templados o incluso fríos. En Toluca, México, se reportó la presencia del complejo en parcelas de maíz ubicadas a más de 2,660 m.s.n.m., altas mesetas, con clima templado subhúmedo y temperatura media anual de 13.7 °C [21]. Así mismo, “la reaparición de *P. maydis* en los Estados Unidos en 2016 y 2017 después de la detección inicial en 2015, sugiere que el patógeno ha sobrevivido a temperaturas bajo cero, lo que no representa los ecosistemas típicos a los que el patógeno está naturalmente adaptado (ambientes tropicales cálidos y húmedos) [19]. El CMA “se está convirtiendo en una nueva amenaza para regiones productoras de maíz con temperaturas de templadas a frías” [20]. En Chiapas, México, el punto de inflexión de la curva epidémica del CMA es promovido por temperaturas de 22.9 a 24.7 °C, con una HR de 83.5 a 91.6 %, y de tres a seis horas con rocío [8]. Las condiciones climatológicas de Chimaltenango se encuentran dentro del nuevo rango reportado para que los patógenos asociados al CMA se puedan establecer. Por otro lado,



al considerar que el ciclo del maíz cultivado en regiones de clima templado es más largo (nueve meses) que en las regiones tropicales (cuatro meses), la amplitud del ciclo de producción también podría permitir un establecimiento prolongado de los patógenos asociados al CMA.

Las pérdidas que puede generar la presencia del CMA en el cultivo dependen de varios factores, incluyendo la resistencia del material, las condiciones agroclimáticas favorables para el desarrollo de los patógenos, la diseminación del agente causal, la etapa de infección y el desarrollo de la enfermedad [14]. Por otro lado, algunos autores aluden a que los brotes severos del CMA pueden afectar el rendimiento, sin ser necesaria la formación de las lesiones conocidas como “ojo de pescado” [22, 14]; en tal sentido hacen referencia a que *Monographella maydis* no es necesaria para que se desarrolle el síntoma de “ojo de pescado” [22]. Así mismo, algunos autores sugieren que *P. maydis* puede ser capaz de causar las lesiones de las manchas negras brillosas, así como las lesiones del ojo de pescado. En Ecuador, síntomas asociados al CMA están presentes, pero no han sido identificados *M. maydis* ni *C. phyllachoreae* [10, 14, 22]. Al confirmar que, en Chimaltenango, al menos uno de los patógenos asociados al CMA (*P. maydis*), está presente en las zonas de producción de maíz, se determina que este patógeno está colonizando áreas con condiciones climatológicas templadas. Por tanto, es posible que, a mediano o largo plazo, la presencia de esta enfermedad pueda afectar la seguridad alimentaria en las regiones del altiplano central de Guatemala.

AGRADECIMIENTOS

La investigación fue desarrollada por el Programa de Protección Vegetal del Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícolas (ICTA). Los agentes de extensión de Chimaltenango del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAGA) facilitaron el acercamiento con los agricultores y las visitas a las parcelas de maíz. Este proyecto fue ejecutado gracias al apoyo financiero del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, por sus siglas en inglés). La gestión para difundir los resultados de la investigación la realizó la Red Latinoamericana de Maíz y el Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED), proyecto TechMaíz.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Astrid Racancoj estableció la investigación, desarrolló la metodología y realizó el trabajo de campo; Glenda Pérez y Astrid Racancoj prepararon las muestras para los análisis moleculares; Johnny Patal elaboró el mapa de interpolación del CMA en Chimaltenango.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no existe conflicto de interés.



REFERENCIAS

- [1] Chávez, O. (2022). Situación del cultivo de maíz en Guatemala: principales limitaciones en la productividad. *ACI Avances En Ciencias E Ingenierías*, 14(1). <https://doi.org/10.18272/aci.v14i1.2596>
- [2] Orellana, A. & Dardón, E. (2012). Aspectos generales y guía para el manejo agronómico del maíz en Guatemala. Guatemala. *ICTA*, 66. <https://www.icta.gob.gt/publicaciones/Maiz/Aspectos%20generales%20y%20guia%20para%20el%20manejo%20del%20maiz.pdf>
- [3] Fuentes, M. (2002). El cultivo de maíz en Guatemala, una guía para su manejo agronómico. *Instituto de Ciencia y Tecnologías Agrícolas. Guatemala*, 45 pp. <https://www.icta.gob.gt/publicaciones/Maiz/cultivoMaizManejoAgronomico.pdf>
- [4] Hock, J., Kranz, J., & Renfro, B. (1989). El complejo 'mancha de asfalto' de maíz: Su distribución geográfica, requisitos ambientales e importancia económica en México. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 7, 129–35.
- [5] Müller E, and Samuels J. (1984). *Monographella maydis* sp. nov. and its connection to the tar spot disease of Zea mays. *Nova Hedwigia* 40, 113–121.
- [6] Hock, J., Dittich, U., Renfro, B., & Kranz, J. (1992). Sequential development of pathogens in the maize tar spot disease complex. *Mycopathologia*, 117, 157–161. <https://doi.org/10.1007/BF00442777>
- [7] López, C., Salazar, O., Dax, R., Osorio, M., Calderón, C., Cabrera, H., Ferrufino, A., Viana, A., Saavedra, D. (2011). Reconocimiento en campo de la mancha de asfalto en el cultivo de maíz. *Red de Innovación Agrícola, Red SICTA/IICA/Cooperación Suiza. Guatemala*. <https://repositorio.iica.int/handle/11324/19971>
- [8] Quiroga-Madrigal, R., Garrido-Ramírez, E., Rosales-Esquinca, M. D., & Salazar-Pinacho, W. (2017). Manual técnico: Manejo integrado del complejo mancha de asfalto del maíz en México. Tuxtla Gutiérrez. *Chiapas, México. Universidad Autónoma de Chiapas*. <https://www.researchgate.net/publication/317929566>
- [9] Pereyra-Hernández, J., Hernández-Morales, J., Sandoval-Islas, J. S., Aranda-Ocampo, S., de León, C. & Gómez-Montiel, N. (2009). Etiología y manejo de la mancha de asfalto (*Phyllachora maydis* Maubl.) del maíz en Guerrero, México. *Agrociencia*, 43(5), 511-519. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-31952009000500006&script=sci_abstract&tlng=pt
- [10] Loladze, A., Rodrigues Jr, F. A., Toledo, F., San Vicente, F., Gérard, B., & Boddupalli, M. P. (2019). Application of remote sensing for phenotyping tar spot complex resistance in maize. *Frontiers in Plant Science*, 10, 552. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00552>
- [11] Liu, L. (1973). Incidence of tar spot disease of corn in Puerto Rico. *J. Agric. Univ. PR*. 57. <https://doi.org/10.46429/jaupr.v57i3.10745>
- [12] Hernández, C. E. P., & Avellaneda, C. (2021). Epidemiología de la mancha de asfalto en maíz bajo diferentes estrategias de manejo. *CEIBA, Zamorano Investiga*, 65-82. <https://revistas.zamorano.edu/index.php/CEIBA/article/view/1269>
- [13] Mahuku, G., Chen, J., Shrestha, R., Narro, L. A., Osorio-Guerrero, K. V., Arcos, A. L. & Xu, Y. (2016). Combined linkage and association mapping identifies a major QTL (qRtsc8-1), conferring tar spot complex resistance in maize. *Theoretical and Applied Genetics*, 129, 1217-1229. <https://doi.org/10.1007/s00122-016-2698-y>
- [14] Telenko, D., Chilvers, M., Kleezewski, N., Smith, D., Bryne, A., DeVillez, P., Diallo, T., Higgins, R., Joos, D., Kohn, K., Lauer, J., Mueller, B., Singh, M., Widdicombe, W. & Williams, L. (2019). How tar spot corn impacted hybrid yields during the 2018 Midwest epidemic. *Crop Protection Network*. <https://doi.org/10.31274/cpn-20190729-002>
- [15] Mottaleb, K., Loladze, A., Sonder, K., Kruseman, G., & San Vicente, F. (2018). Threats of tar spot complex disease of maize in the United States of America and its global consequences. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 24, 281-300 <https://doi.org/10.1007/s11027-018-9812-1>
- [16] ICTA Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícolas. (2022). *ICTA Grano de Oro, híbrido amarillo resistente a mancha de asfalto*. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=XKuOZYw87s8>
- [17] Cruz, A., & Choc, R. (2018). Estimación, espacial de mancha de asfalto en maíz, en los municipios de la Franja transversal del Norte, Alta Verapaz, Guatemala. *ICTA*. <https://www.icta.gob.gt/publicaciones/Informes%20Finales%20IICA-CRIA%202020/4%20MAIZ%20NORTE/Mancha%20Asfalto-CUNOR-%20A%20Ru%20C3%ADz/Informe%20IICA%20Ma%20C3%ADz%20Asfalto.pdf>



- [18] Cortez, M., Castellanos, L., & Aldana, A. (2010). *Evaluación de cinco fungicidas comerciales para el manejo del patógeno causante de la mancha de asfalto (Phyllachora maydis maubl.) en el cultivo de maíz (Zea mays L.)*. El Salvador. Escuela Nacional de Agricultura "Roberto Quiñonez". <https://ena.edu.sv/wp-content/uploads/2021/02/Comparaci%C3%B3n-del-efecto-de-cinco-fungicidas-comerciales..pdf>
- [19] Kleczewski, N., Plewa, D., Bissonnette, K., Bowman, N., Byrne, J., LaForest, J., Dalla-Lana, F., Malvick, D., Mueller, D., Chilvers, M., Paul, P., Raid, R., Robertson, A., Ruhl, G., Smith, D., & Telenko (2020). Documenting the establishment, spread, and severity of *Phyllachora maydis* on corn, in the United States. *Journal of Integrated Pest Management*, 11(1), 14. <https://doi.org/10.1093/jipm/pmaa012>
- [20] Valle, J., Ross, T., Plewa, D., Avellaneda, M., Check, J., Chilvers, M., Cruz, A., Dalla, F., Groves C, Gongora-Canul, C., Henriquez-Dole, L., Jamann, T., Kleczewski, N., Lipps, S., Malvick D, McCoy, AG., Mueller, D., Paul PA., Puerto, C., Schloemer, C., Raid, R., Robertson, A., Roggenkamp, E., Smith, D., Telenko, D., & Cruz, C. (2020). Tar spot and understudied disease threatening corn production in the Americas. *Plant Disease*. 104(10), 2541-2550. <https://doi.org/10.1094/PDIS-02-20-0449-FE>.
- [21] Ríos, E., Partida, L., Ochoa, Y, Cerna, E., Hernández, F., Flores, A., Olalde, V. and Rodríguez, R. (2016) First report on the presence of *Phyllachora* sp. in corn crops at Toluca, Estado de Mexico. *American Journal of Plant Sciences*, 7(5), 733-739. <https://doi.org/10.4236/ajps.2016.75067>
- [22] McCoy, A., Roth, M., Shay, R., Noel, Z., Jayawardana, M., Longley, R., Bonito, G., & Chilvers, M. (2019). Identification of fungal communities within the tar spot complex of corn in Michigan via next-generation sequencing. *Phytobiomes journal*, 3(3), 235-243. <https://doi.org/10.1094/PBIOMES-03-19-0017-R>

Efectividad de la fertilización líquida y bioestimulación en el rendimiento y rentabilidad del cultivo de maíz (*Zea mays* L.) para consumo en fresco

Vicente Antonio Vera Bravo¹, Benny Alexander Avellán Cedeño², Galo Alexander Cedeño García³, Sofía del Rocío Velázquez Cedeño³, Geoconda López Álava³, José Luis Zambrano Mendoza⁴

¹Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López, Maestría en Ingeniería Agrícola mención Fitotecnia, Calceta, Ecuador.

²Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias, Estación Experimental Portoviejo, Núcleo de Desarrollo Tecnológico, Portoviejo, Ecuador.

³Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López, Carrera de Ingeniería Agrícola, Calceta, Ecuador.

⁴Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias, Estación Experimental Santa Catalina, Programa de Maíz, Quito, Ecuador.

*Autor para correspondencia/Corresponding author: benny.avellan@iniap.gob.ec

Effectiveness of liquid fertilization and bio-stimulation on yield and profitability of maize (*Zea mays* L.) for fresh consumption

Abstract

The consumption of sweet corn is very important in some coastal areas from the Equator. The goal of the study was to analyze the effectiveness of liquid fertilization and biostimulation on the yield and profitability of the INIAP 543 – QPM sweet corn (choclo). The work was carried out during two different rainy seasons in January-2021 and May-2022, in the locations of El Cady in Portoviejo, Danzarín in Rocafuerte, and El Limón in Bolívar, located at coordinates 1°07'14.6"S - 80°24'39.7"W, 0°54'42.0"S - 80°24'17.4"W, and 0°49'49.1"S - 80°10'48.6"W, respectively. The evaluated treatments were liquid fertilization + bio-stimulation (LF + BIO), granular fertilization + bio-stimulation (GF + BIO), granular fertilization (GF), and a control treatment without fertilization or bio-stimulation. A completely randomized block design was used, with four treatments and five replications. Corn ear yield (CEY), agronomic nitrogen efficiency (ANE), and economic profitability were recorded. The treatments had a significant influence ($p < 0.05$) on CEY and ANE in both planting seasons and in the three locations evaluated. The LF + BIO and GF + BIO treatments achieved higher CEY with averages of 9.00 and 8.43 t ha⁻¹, with respect to the GF and control treatments with 7.76 and 3.26 t ha⁻¹, respectively. Similarly, on average, ANE was higher in the LF + BIO and GF + BIO treatments with 38.26 and 34.47 kg of CEY kg⁻¹ of N applied, in contrast to the GF treatment that achieved an average ANE of 30.01 of CEY kg⁻¹ of N applied. On the other hand, LF + BIO achieved greater increases in CEY and ANE with respect to GF + BIO. Economic profitability averaged USD\$0.78 and USD\$0.73 per each dollar invested for the LF + BIO and GF + BIO treatments, respectively, in comparison to the profitability of the GF and control treatments, which achieved a profit of USD\$0.66 and USD\$0.42 per each dollar invested. The results obtained allow us to conclude that under rainfall conditions, surface soil moisture depends on water



Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /
Edited by:
María Gabriela Albán

Recibido /
Received:
17/06/2024

Aceptado /
Accepted:
19/08/2024

Publicado en línea /
Published online:
29/11/2024



precipitation and therefore does not guarantee a permanent field capacity in the soil. In such conditions, edaphic fertilization applied in a diluted manner can be more efficient and convenient than granulated fertilization applied in a superficial band. In addition, under rainfall conditions, biostimulation is a technology that contributes to boost the edaphic fertilization of sweet corn, and its implementation is economically viable.

Keywords: Sweet corn, diluted fertilization, Granulated fertilization, Bio-stimulants, Productivity, Economic profit, Efficient use of nutrients.

Resumen

El consumo de maíz en fresco, tierno o choclo es muy importante en ciertas zonas costeras del litoral ecuatoriano. El propósito principal del estudio fue analizar la efectividad de la fertilización líquida y la bioestimulación en el rendimiento y la rentabilidad del maíz INIAP 543 – QPM destinado al consumo en forma de choclo. El trabajo se ejecutó durante las temporadas lluviosas 2021 y 2022, que se desarrollan de enero a mayo, en las localidades El Cady de Portoviejo, Danzarín de Rocafuerte y El Limón de Bolívar, ubicadas en las coordenadas 1°07'14.6"S - 80°24'39.7"W, 0°54'42.0"S - 80°24'17.4"W y 0°49'49.1"S - 80°10'48.6"W, respectivamente. Los tratamientos evaluados fueron la fertilización líquida + bioestimulación (FL + BIO), fertilización granulada + bioestimulación (FG + BIO), fertilización granulada (FG) y un tratamiento control sin fertilización ni bioestimulación. Se utilizó un diseño de bloques completos al azar, con cuatro tratamientos y cinco repeticiones. Se registró el rendimiento de mazorcas (RM), eficiencia agronómica del nitrógeno (EAN) y rentabilidad económica. Los tratamientos influyeron de manera significativa ($p < 0,05$) en el RM y la EAN en ambas temporadas de siembra y en las tres localidades evaluadas. Los tratamientos de FL + BIO y FG + BIO lograron mayor RM con promedios de 9,00 y 8,43 t ha⁻¹, con respecto a los tratamientos de FG y control con 7,76 y 3,26 t ha⁻¹, respectivamente. De forma similar, en promedio la EAN fue mayor en los tratamientos FL + BIO y FG + BIO con 38,26 y 34,47 kg de mazorcas kg⁻¹ de N aplicado, en contraste al tratamiento de FG que logró una EAN promedio de 30,01 kg de mazorcas kg⁻¹ de N aplicado. Por otra parte, La FL + BIO logró mayores aumentos en RM y EAN con respecto a la FG + BIO. La rentabilidad económica en promedio fue de 0,78 y 0,73 dólares por cada dólar invertido en los tratamientos FL + BIO y FG + BIO, respectivamente, en comparación con la rentabilidad de los tratamientos FG y control, que lograron ganancias de 0,66 y 0,42 dólares, respectivamente, por cada dólar invertido. Los resultados logrados permiten concluir, que bajo condiciones de secano, donde la humedad superficial del suelo depende de las lluvias, y no siempre hay garantía de que se mantenga a capacidad de campo constante. En esas condiciones, la fertilización edáfica aplicada de manera diluida puede ser más eficiente y conveniente que la granulada aplicada en banda superficial. Además, bajo condiciones de temporal o secano, la bioestimulación es una tecnología que contribuye a potenciar la fertilización edáfica del maíz, siendo económicamente viable su aplicación.

Palabras clave: choclo, nutrición diluida, nutrición granulada, bioestimulantes, productividad, beneficio económico, uso eficiente de nutrientes.

INTRODUCCIÓN

La producción de maíz (*Zea mays* L.) en el mundo se ha incrementado en las últimas décadas en un 118 % con relación a 1995, lo cual ha sido impulsado por la demanda de la industria agroalimentaria y animal [1]. En el Ecuador, el maíz es un rubro de gran importancia social y económica debido a que genera fuentes de empleo, satisface la demanda interna de la industria y la seguridad alimentaria local [2]. En el país se han desarrollado cultivares de maíz de grano color blanco de alta calidad proteica para consumo en tierno o choclo, alimentación animal como forraje y la industria harinera local [3, 4]. A pesar de esto, el principal problema del cultivo es la baja productividad, con un rendimiento promedio de 5,76 t ha⁻¹, en comparación con otros países de la región, como Estados Unidos y Argentina, que superan las 8,0 t ha⁻¹ [5]. Manabí, es la segunda provincia del Ecuador con mayor superficie maicera del país, con el 29,60 % de la producción nacional, pero más del 90 % del área se cultiva en secano, y alrededor del 83 % de las precipitaciones se presenta en un corto periodo de tiempo entre los meses de enero y abril, lo cual afecta seriamente el rendimiento del cultivo cuando se producen sequías repentinas, que se han presentado con mayor frecuencia en los últimos años en medio de la época de lluvias [5, 6, 7, 8, 9, 10].

Las sequías repentinas se intensifican rápidamente y ocurren en cualquier lugar y época del año, pudiendo reducir en más del 50% los valores de precipitación, además de ocasionar graves impactos socioeconómicos, sanitarios y ambientales [11, 12]. En este contexto, el estrés hídrico debido a la falta de lluvias impacta negativamente en la fertilización y nutrición del maíz, donde se han reportado reducciones de rendimiento de hasta el 38 % [13]. La ausencia de humedad en la superficie del suelo impide la adecuada solubilización de los fertilizantes granulados aplicados en banda superficial, lo que resulta en pérdidas significativas por volatilización, lixiviación y escorrentía cuando las lluvias regresan de manera intensa. Estos extremos climáticos promueven la pérdida de nutrientes en más del 40 %, intensificando la contaminación ambiental [14, 15, 16, 17]. Sumando a lo anterior, la disponibilidad de nutrientes para el cultivo está en gran medida regulada por la cantidad de agua disponible en el suelo, y durante los episodios de sequía o estrés hídrico, los cultivos pueden verse limitados simultáneamente por agua y nutrientes [16, 18], más aún el maíz que requiere cantidades elevadas de N, P y K, necesitando en promedio unos 18, 10 y 25 kg de N, P y K por cada tonelada de grano producido [19].

La fertilización de forma diluida ofrece la ventaja de que los nutrientes se aportan disueltos al suelo, lo que puede facilitar su movimiento hacia las raíces incrementando su absorción y uso eficiente, particularmente en momentos donde la humedad superficial del suelo no es suficiente para que los fertilizantes granulados se solubilizan completamente [20, 21, 22, 23]. Por otra parte, los bioestimulantes son productos orgánicos o inorgánicos que contienen sustancias bioactivas y/o microorganismos, que, aplicados a la planta, estimulan su crecimiento, productividad y calidad; por tanto, son tecnologías agronómicas que han mostrado una alta efectividad para aumentar el uso eficiente de nutrientes e impulsar el desarrollo y productividad de los cultivos bajo condiciones de estrés [24, 25, 26]. En esta línea, investigaciones realizadas por varios autores han demostrado que la fertilización líquida produce aumentos significativos en rendimiento mayores al 10 % en comparación con la fertilización granulada tradicional,



lo cual contribuye a aumentar el uso eficiente de nutrientes y rentabilidad del cultivo, incluso bajo condiciones de déficit hídrico del suelo [27, 28, 29]. Por otra parte, el uso de bioestimulantes en maíz ha evidenciado un efecto potenciador de la fertilización, el uso eficiente de nutrientes y rendimiento, y según varios autores, es posible lograr equilibrios entre productividad y reducción de la contaminación [30, 31, 32].

En el país, las ventajas que ofrecen la fertilización líquida y la bioestimulación no han sido exploradas de manera combinada en maíz de secano, donde la nutrición se complica cuando ocurren eventos de sequías repentinas en medio de la época de lluvias. Por lo tanto, este vacío de conocimiento no permite hacer mejoras en la nutrición del maíz; razón por la cual, el objetivo del trabajo fue determinar la efectividad de la fertilización líquida y bioestimulación en el rendimiento y la rentabilidad del cultivo de maíz para consumo en choclo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización

La investigación se desarrolló durante las temporadas lluviosas de 2021 y 2022 que ocurren entre enero y mayo, en las localidades de Danzarín-Rocafuerte, El Cady-Portoviejo y El Limón-Bolívar de la provincia de Manabí en Ecuador. Las características edafoclimáticas de las localidades en estudio se describen en la tabla 1.



TABLA 1. Características de clima y suelo de los sitios experimentales de evaluación de diversos métodos de aplicación de nutrientes y bioestimulantes en tres cantones de la provincia de Manabí, Ecuador.

Parámetro	Rocafuerte	Portoviejo	Bolívar
N-NH ₄ (mg kg ⁻¹)	6,0	7,0	12,0
P (mg kg ⁻¹)	38,0	40,0	91,0
K (Cmol _c kg ⁻¹)	1,25	0,70	1,81
Ca (Cmol _c kg ⁻¹)	22,0	19,0	17,0
Mg (Cmol _c kg ⁻¹)	2,7	4,1	5,8
S (mg kg ⁻¹)	6,0	8,0	5,0
Zn (mg kg ⁻¹)	2,9	1,2	2,3
Cu (mg kg ⁻¹)	6,7	3,6	7,3
Fe (mg kg ⁻¹)	17,0	30,0	51,0
Mn (mg kg ⁻¹)	2,7	14,0	1,9
B (mg kg ⁻¹)	0,40	0,56	0,74
MO (%)	1,1	1,7	2,2
pH	7,2	7,1	6,8
Coordenadas geográficas	0°54'42.0"S 80°24'17.4"W	1°07'14.6"S 80°24'39.7"W	0°49'49.1"S 80°10'48.6"W
Altitud (msnm)	9,4	47	15
Temperatura media anual (°C)	26,2	26,4	26,1
Humedad relativa (%)	84	81	83
Precipitación anual (mm)	245,30	851,57	1003,80

Tratamientos, diseño y unidad experimental

Los tratamientos evaluados fueron: T₁=fertilización edáfica líquida (en drench) + bioestimulación (FL + BIO), T₂=fertilización granulada en banda superficial (convencional) + bioestimulación (FG + BIO), T₃=fertilización granulada o convencional (FG) y T₄=tratamiento control (sin fertilizante). Se utilizó un diseño de bloques completamente al azar, con cuatro tratamientos, cinco repeticiones y 20 unidades experimentales. Cada unidad experimental estuvo conformada con parcelas de 24 m², donde las plantas fueron sembradas a 0,80 m entre hileras y a 0,25 m entre plantas; con una densidad de 50000 plantas ha⁻¹. Como material de siembra se utilizó la variedad de libre polinización de grano color blanco INIAP 543-QPM.

Registro de variables y análisis de datos

Se registraron componentes de rendimiento como longitud, diámetro y peso de mazorcas con brácteas, para lo cual se tomaron al azar cinco mazorcas del centro de



cada unidad experimental. La longitud se midió en cm desde la base hasta el ápice de la mazorca. El diámetro se midió en cm en el tercio medio de la mazorca. El peso se registró en g con una balanza analítica de precisión. Otra variable registrada fue la cantidad de mazorcas comerciales en términos de bultos de 150 mazorcas denominados almud, que es la unidad comercial a nivel local para choclos. La eficiencia agronómica del nitrógeno (EAN) fue estimada con la ecuación descrita por Ren et al. [28]:

$$EAN = \frac{\text{Rendimiento con N} - \text{Rendimiento sin N}}{\text{Dosis de N aplicado}}$$

Los datos se analizaron mediante el análisis de varianza y en caso de encontrarse significancia estadística se realizó el análisis de medias con la prueba de Tukey al 5 %. Se utilizó el paquete estadístico InfoStat versión 2020.

El análisis económico se realizó de acuerdo al método propuesto por Ayvar-Serna et al. [33], donde el costo total (CT) proviene de sumar los costos fijos (CF) y los costos variables (CV) ($CT = CF + CV$). El ingreso total (IT) se obtuvo a partir de la venta de la producción de mazorcas en almud ($IT = PP * Ren$), donde: PP = Precio del producto (\$US/Almud), Ren = Rendimiento por hectárea (Almud/ha). El ingreso neto (IN) se calculó mediante la diferencia entre el ingreso total y el costo total ($IN = IT - CT$). La ganancia por dólar invertido (GDI) se calculó dividiendo el ingreso neto para el costo total ($GDI = IN/CT$).

Manejo específico del experimento

Antes de realizar la siembra, las semillas de maíz fueron tratadas con imidacloprid + thiodicarb, en dosis de 25 mL kg⁻¹ de semilla. A los 10 días después de la siembra, se realizó una aplicación en drench con thiametoxam, en dosis de 1 mL L⁻¹ de agua, con la finalidad de proteger las plantas de insectos chupadores. Para el control de insectos vectores (cicadélidos, pulgones, trips y crisomélidos) y en base a monitoreo, se aplicó fipronil, en dosis de 0,7 mL L⁻¹ agua, y cuando fue necesario repetir el control, se utilizó lambda cihalotrina + thiametoxam, en dosis de 1 mL L⁻¹ agua. El control de gusano cogollero se complementó con los insecticidas Spinetoram y Lufenuron en dosis de 100 mL ha⁻¹ y 0,5 L ha⁻¹, respectivamente. El control pre-emergente de arvenses se realizó con Pendimetalin 2 L ha⁻¹ + Atrazina 1,2 L ha⁻¹. El control pos-emergente se realizó con el herbicida Mesotrione en dosis de 0,40 L ha⁻¹.

La fertilización se realizó con dosis de 150, 23, 60, 30 y 50 kg ha⁻¹ de N, P₂O₅, K₂O, MgO y S, respectivamente. En el tratamiento con fertilización convencional granulada en banda superficial, se utilizaron los fertilizantes urea (46 % N), DAP (18 % N y 46 % P₂O₅), cloruro de potasio (60 % K₂O), sulfato de magnesio (25 % MgO y 20 % S) y sulfato de amonio (21 % N y 24 % S). Para el tratamiento de fertilización líquida se utilizaron los fertilizantes urea (46 % N), fosfato mono potásico soluble (52 % P₂O₅ y 34 % K₂O), sulfato de magnesio soluble (16 % MgO y 13 % S), muriato de potasio soluble (60 % K₂O) y sulfato de amonio (21 % N y 24 % S). La solubilidad de estos fertilizantes fue de 1080, 225, 800, 200 y 900 g L⁻¹ de agua. El fraccionamiento de la fertilización nitrogenada en ambos tratamientos se realizó de acuerdo a lo recomendado por García y Espinosa [34], colocando el 20 % en la etapa fenológica VE, el 40 % en la etapa V6 y el 40 % en la etapa V10. El fertilizante



fosfatado se aplicó 100 % en la etapa VE. Los demás fertilizantes se aplicaron en dos fracciones: el 50 % en etapa VE y el 50 % en etapa V6.

Para la aplicación de fertilizantes solubles, se prepararon soluciones madres en tanques separados de acuerdo a la solubilidad y compatibilidad. En cada aplicación se disolvieron en tanques A los fertilizantes urea y cloruro de potasio, mientras que en los tanques B los fertilizantes fosfato mono potásico, sulfato de magnesio y sulfato de amonio. Luego se mezclaron y se llevó hasta un volumen de 1 250 litros de agua (6,25 tanques de 200 L). De esta solución final se aplicó 25 mL planta⁻¹ en drench con ayuda de una bomba de mochila dosificadora modelo Doser. Este procedimiento se repitió en las tres aplicaciones de fertilización (VE, V6 y V10). Se realizaron cuatro aplicaciones de bioestimulantes, de las cuales dos se hicieron en drench en las etapas VE y V6. Las dos aplicaciones restantes fueron realizadas al follaje en las etapas V10 y V15. En drench se aplicó una mezcla de bioestimulantes con ácidos orgánicos, extracto de algas y micronutrientes, en dosis de 2 L ha⁻¹. En las aplicaciones foliares se aplicó una combinación de bioestimulantes a base de ácido salicílico, fitoreguladores y micronutrientes, en dosis de 2 L ha⁻¹.

RESULTADOS

Los diversos métodos de fertilización influenciaron significativamente ($p < 0,05$) los componentes de rendimiento del maíz INIAP 543-QPM en las tres localidades y en ambas temporadas evaluadas. Los tratamientos de fertilización líquida y granulada con bioestimulación (FL + BIO y FG + BIO) lograron los mayores promedios de longitud de mazorca, diámetro de mazorca y peso de mazorca con relación a la fertilización granulada convencional (FG) y el tratamiento control, siendo la FL + BIO la que logró los mayores valores promedio (Tabla 2). Como promedio de las tres localidades durante la temporada 2021, la longitud de mazorca bajo el efecto de la FL + BIO fue un 12,96, 22,74 y 45,22 % superior a los tratamientos FG + BIO, FG y control, respectivamente. Así mismo, para la temporada 2022 la longitud de mazorca fue incrementada un 11,27, 22,54 y 39,37 % con la FL + BIO, con respecto a los tratamientos FG + BIO, FG y control, en su orden respectivo (Tabla 2).

En promedio de las tres localidades para la temporada 2021, el diámetro de mazorca bajo el efecto de la FL + BIO fue superior a los tratamientos FG + BIO, FG y control con un 4,27, 13,89 y 36,75 %, respectivamente. De manera similar ocurrió para la temporada 2022, donde la FL + BIO alcanzó el mayor aumento en diámetro de mazorca con el 7,89, 17,48 y 39,87 % sobre los tratamientos FG + BIO, FG y control, respectivamente (Tabla 2). En cuanto al peso de mazorcas para la temporada 2021, el tratamiento FL + BIO promovió el mayor aumento con el 6,24, 20,11 y 50,55 %, con relación a los tratamientos FG + BIO, FG y control, respectivamente. De la misma forma, para la temporada 2022 el tratamiento de FL + BIO logró el mayor incremento en peso de mazorca con un 12,21, 19,01 y 38,29 %, en comparación a los tratamientos FG + BIO, FG y control, en su respectivo orden (Tabla 2).

TABLA 2. Efecto de la aplicación de nutrientes y bioestimulantes sobre la longitud, diámetro y peso de mazorcas de maíz INIAP 543-QPM, en condiciones de temporal o seco en tres cantones de Manabí, Ecuador.

Tratamientos	Año 2021			Año 2022		
	Longitud de mazorca (cm)	Diámetro de mazorca (cm)	Peso de mazorca (g)	Longitud de mazorca (cm)	Diámetro de mazorca (cm)	Peso de mazorca (g)
Portoviejo						
FL + BIO	23.64 a	4.41 a	335.33 a	20.72 a	4.69 a	259.10 a
FG + BIO	20.77 b	4.35 a	315.61 a	19.12 b	4.47 a	234.50 b
FG	18.64 c	4.22 a	266.11 b	17.05 c	3.80 b	214.87 c
Control	13.21 d	2.87 b	151.39 c	13.81 d	2.81 c	164.92 d
p-valor ANOVA	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
C.V. %	5.32	5.98	6.84	3.24	6.00	3.10
Rocafuerte						
FL + BIO	22.82 a	4.89 a	278.08 a	24.12 a	4.53 a	263.41 a
FG + BIO	20.45 b	4.66 a	259.62 a	20.58 b	4.25 ab	228.68 b
FG	17.57 c	4.10 b	221.66 b	18.26 c	3.97 b	210.81 b
Control	10.85 d	2.93 c	169.13 c	14.96 d	2.96 c	166.96 c
p-valor ANOVA	0.0211	0.0032	0.0001	0.0001	0.0120	0.0205
C.V. %	5.15	3.18	4.28	3.67	4.25	4.85
Bolívar						
FL + BIO	23.19 a	4.75 a	263.05 a	25.42 a	4.84 a	280.57 a
FG + BIO	19.40 b	4.42 b	244.19 b	22.64 b	4.23 b	241.84 b
FG	17.61 b	3.77 c	213.70 c	19.10 c	3.85 b	217.54 c
Control	14.11 c	3.08 d	158.97 d	13.84 d	2.68 c	163.72 d
p-valor ANOVA	0.0021	0.0001	0.0001	0.0014	0.0234	0.0001
C.V. %	5.70	2.76	3.71	4.55	5.83	3.84

Tratamientos: FL + BIO = fertilización líquida + bioestimulación; FG + BIO = fertilización granulada + bioestimulación; FG = fertilización granulada; C.V. = coeficiente de variación

La producción y rendimiento de las mazorcas fueron afectadas significativamente ($p < 0,05$) por los diversos tratamientos de fertilización aplicados en las tres localidades y durante las dos temporadas de siembra probadas; siendo el tratamiento FL + BIO el que logró los mayores resultados (Tabla 3). Durante la temporada 2021, considerado el promedio de las tres localidades, el tratamiento de FL + BIO logró una producción adicional de 4072, 9125 y 18775 mazorcas comerciales en comparación a los tratamientos de FG + BIO, FG y control, respectivamente. Por su parte, el rendimiento de mazorcas fue un 5,79, 13,72 y 64,52 % superior en el tratamiento de FL + BIO con relación a los tratamientos FG +



BIO, FG y control, en su respectivo orden, esto como promedio de las tres localidades evaluadas (Tabla 3). Para la temporada 2022, el tratamiento de FL + BIO como promedio de las tres zonas de estudio produjo 4590, 8793 y 18702 mazorcas comerciales adicionales con respecto a los tratamientos FG + BIO, FG y control, respectivamente. Una tendencia similar fue observada para el rendimiento de mazorcas, donde en el promedio de las tres localidades el tratamiento de FL + BIO logró un incremento del 6,91, 13,82 y 63,02 % superior a los tratamientos FG + BIO, FG y control, respectivamente (Tabla 3).

TABLA 3. Efecto de la aplicación de nutrientes y bioestimulantes sobre la producción de mazorcas comerciales y rendimiento de mazorcas de maíz INIAP 543-QPM, bajo condiciones de temporal o seco en tres cantones de Manabí, Ecuador.

Tratamientos	Año 2021		Año 2022	
	Mazorcas comerciales	Rendimiento de mazorcas comerciales (t ha ⁻¹)	Mazorcas comerciales	Rendimiento de mazorcas comerciales (t ha ⁻¹)
Portoviejo				
FL + BIO	39338 a	9.35 a	40789 a	8.58 a
FG + BIO	35236 b	8.84 a	36788 b	7.84 b
FG	30213 c	7.83 b	32236 c	7.28 c
Control	20402 d	2.78 c	21837 d	3.23 d
p-valor ANOVA	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
C.V. %	5.49	4.31	4.23	4.42
Rocafuerte				
FL + BIO	40264 a	9.31 a	39778 a	8.91 a
FG + BIO	36127 b	8.71 ab	35257 b	8.46 ab
FG	31101 c	8.14 b	31526 c	8.00 b
Control	20845 d	3.49 c	22469 d	3.38 c
p-valor ANOVA	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
C.V. %	4.67	4.98	6.78	5.71
Bolívar				
FL + BIO	39678 a	9.33 a	40432 a	8.55 a
FG + BIO	35700 ab	8.81 b	35184 b	7.94 b
FG	30591 b	8.18 c	30859 c	7.16 c
Control	21709 c	3.67 d	20586 d	3.03 d
p-valor ANOVA	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
C.V. %	6.22	4.82	5.99	6.07

Tratamientos: FL + BIO = fertilización líquida + bioestimulación; FG + BIO = fertilización granulada + bioestimulación; FG = fertilización granulada; C.V. = coeficiente de variación



Los diversos tratamientos aplicados tuvieron un efecto significativo ($p < 0,05$) sobre la eficiencia agronómica del nitrógeno (EAN), donde la FL + BIO logró la mayor EAN con relación a los tratamientos de FG + BIO y FG, en las tres zonas de estudio y en las dos temporadas de siembra (Figuras 1 y 2). Para la temporada 2021, en la localidad de Portoviejo, la EAN fue de 43,82 kg de mazorcas kg^{-1} de N aplicado con la FL + BIO, lo cual fue superior a la FG + BIO y FG con un 7,83 y 23,21 %, respectivamente. En la zona de Rocafuerte sucedió de manera similar, donde la FL + BIO logró la mayor EAN con 38,82 kg de mazorcas kg^{-1} de N aplicado, con un incremento del 10,30 y 20,14 % sobre los tratamientos de FG + BIO y FG en su orden respectivo. De la misma manera se produjo en Bolívar, donde el tratamiento FL + BIO alcanzó el mayor valor de EAN con 37,78 kg de mazorcas kg^{-1} de N aplicado, con un aumento del 9,24 y 20,33 % sobre los tratamientos FG + BIO y FG, respectivamente (Figura 1).

Para la temporada 2022, el tratamiento de FL + BIO produjo el mayor promedio de EAN en Portoviejo con 35,64 kg de mazorcas kg^{-1} de N aplicado, superando con el 13,83 y 24,27 % a los tratamientos de FG + BIO y FG, respectivamente. Tendencia similar se evidenció para la localidad de Rocafuerte, donde la FL + BIO logró una EAN de 36,87 kg de mazorcas kg^{-1} de N aplicado, con relación a los tratamientos de FG + BIO y FG que alcanzaron una EAN de 33,85 y 30,78 kg de mazorcas kg^{-1} de N aplicado, respectivamente. Así mismo, en la zona de Bolívar, la FL + BIO produjo la mayor EAN con 36,67 kg de mazorcas kg^{-1} de N aplicado, superando a los tratamientos de FG + BIO y FG con el 10,64 y 24,90 %, respectivamente (Figura 2).

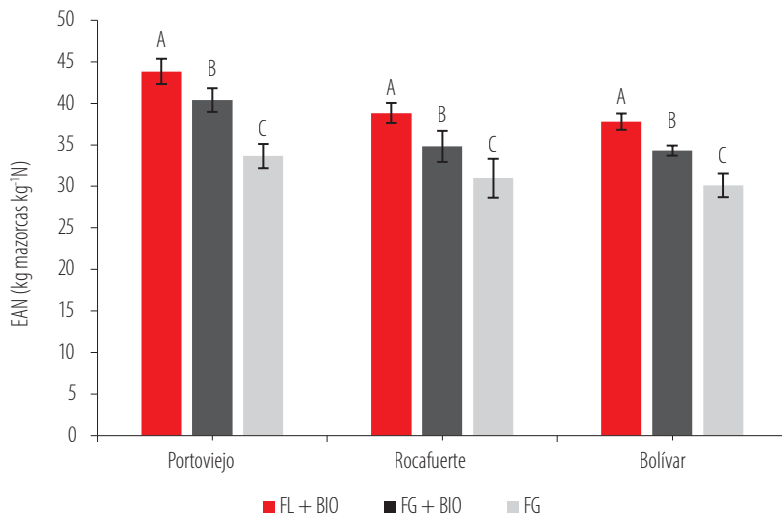


FIGURA 1. Eficiencia agronómica del nitrógeno con tres métodos de aplicación de nutrientes y bioestimulantes en el cultivo de maíz para choclo durante la temporada lluviosa de 2021 en tres cantones de Manabí, Ecuador. FL + BIO = fertilización líquida + bioestimulación; FG + BIO = fertilización granulada + bioestimulación; FG = fertilización granulada.

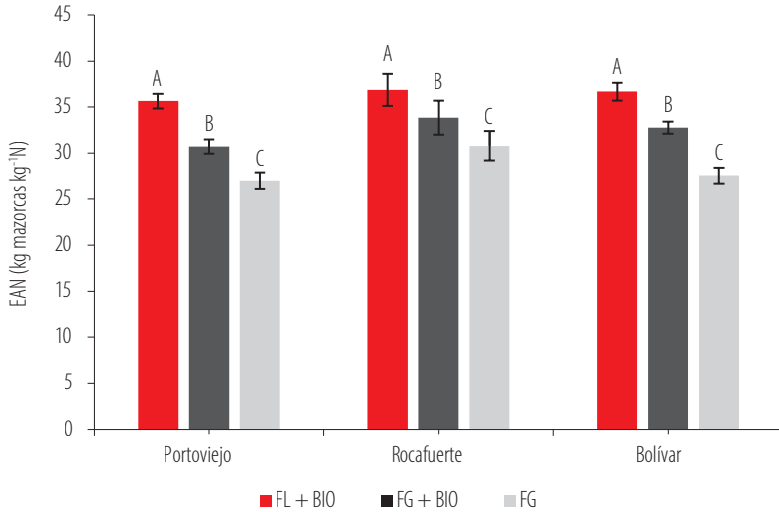


FIGURA 2. Eficiencia agronómica del nitrógeno con tres métodos de aplicación de nutrientes y bioestimulantes en el cultivo de maíz para choclo durante la temporada lluviosa de 2022 en tres cantones de Manabí, Ecuador. FL + BIO = fertilización líquida + bioestimulación; FG + BIO = fertilización granulada + bioestimulación; FG = fertilización granulada.

La rentabilidad económica fue mayor en los tratamientos de fertilización con bioestimulación (FL + BIO y FG + BIO) frente al tratamiento de fertilización convencional, en ambas temporadas de siembra y localidades evaluadas (Tablas 4 y 5), lo cual denota las ventajas económicas del uso de bioestimulantes para complementar la fertilización. En la temporada 2021, para la zona de Portoviejo, la rentabilidad del tratamiento FL + BIO fue de 0,75 dólares por cada dólar invertido, lo cual fue superior a los tratamientos de FG + BIO, FG y control con el 5,33, 18,67 y 52 %, respectivamente. De la misma manera ocurrió para la zona de Rocafuerte, donde la FL + BIO logró la mayor rentabilidad con 0,79 dólares por cada dólar invertido, que superó a la FG + BIO, FG y control, con el 5,06, 16,46 y 50,63 %, respectivamente. De forma similar, se presentó para la localidad de Bolívar, donde la FL + BIO alcanzó la mayor rentabilidad con 0,76 dólares por cada dólar invertido, con incrementos del 3,95, 17,11 y 40,79 % sobre los tratamientos de FG + BIO, FG y control, en su orden respectivo (Tabla 4). Para la temporada 2022 se lograron resultados con la misma tendencia del 2021, donde el tratamiento de FL + BIO alcanzó mayor rentabilidad económica con el 0,81, 0,77 y 0,80 dólares por cada dólar invertido en las localidades de Portoviejo, Rocafuerte y Bolívar, respectivamente, seguido de los tratamientos de FG + BIO, FG y control con menor rentabilidad en las tres localidades (Tabla 5). Los resultados evidencian que la fertilización en forma líquida, a pesar de tener un mayor costo, tiende a incrementar el rendimiento y rentabilidad del choclo en temporal o seco con respecto a la fertilización convencional o granulada aplicada en banda superficial. Además, la bioestimulación, independientemente del tipo de fertilización, ayuda a potenciar el rendimiento del cultivo de maíz INIAP 543-QPM en estado de choclo bajo condiciones de temporal, y su aplicación se justifica plenamente desde lo económico.



TABLA 4. Análisis de rentabilidad económica de tres métodos de aplicación de nutrientes y bioestimulantes en el cultivo de maíz para choclo variedad INIAP 543-QPM, durante la temporada lluviosa de 2021, en tres cantones de Manabí, Ecuador.

Tratamientos	Rendimiento (almud/ha)	PV (USD/almud)	IT = PV*Rend	CT = CF+CV	IN = IT-CT	RBC = IN/CT
Portoviejo						
FL + BIO	262	12	3147	1800	1347	0.75
FG + BIO	235	12	2819	1650	1169	0.71
FG	201	12	2412	1500	912	0.61
Control	136	12	1632	1200	432	0.36
Rocafuerte						
FL + BIO	268	12	3221	1800	1421	0.79
FG + BIO	241	12	2892	1650	1242	0.75
FG	207	12	2484	1500	984	0.66
Control	139	12	1668	1200	468	0.39
Bolívar						
FL + BIO	265	12	3174	1800	1374	0.76
FG + BIO	238	12	2856	1650	1206	0.73
FG	204	12	2448	1500	948	0.63
Control	145	12	1740	1200	540	0.45

FL + BIO = fertilización líquida + bioestimulación; FG + BIO = fertilización granulada + bioestimulación; FG = fertilización granulada; PV: precio de venta; IT: ingresos totales; Rend: rendimiento; CT: costos totales; CF: costos fijos; CV: costos variables; IN: ingresos netos; RBC: relación beneficio/costo.



TABLA 5. Análisis de rentabilidad económica de tres métodos de aplicación de nutrientes y bioestimulantes en el cultivo de maíz para choclo variedad INIAP 543-QPM, durante la temporada lluviosa de 2022, en tres cantones de Manabí, Ecuador.

Tratamientos	Rendimiento (almud/ha)	PV (USD/almud)	IT = PV*Rend	CT = CF+CV	IN = IT-CT	RBC = IN/CT
Portoviejo						
FL + BIO	272	12	3263	1800	1463	0.81
FG + BIO	245	12	2943	1650	1293	0.78
FG	215	12	2579	1500	1079	0.72
Control	146	12	1747	1200	547	0.46
Rocafuerte						
FL + BIO	265	12	3182	1800	1382	0.77
FG + BIO	235	12	2821	1650	1171	0.71
FG	210	12	2522	1500	1022	0.68
Control	150	12	1798	1200	598	0.50
Bolívar						
FL + BIO	270	12	3235	1800	1435	0.80
FG + BIO	235	12	2815	1650	1165	0.71
FG	206	12	2469	1500	969	0.65
Control	137	12	1647	1200	447	0.37

FL + BIO = fertilización líquida + bioestimulación; FG + BIO = fertilización granulada + bioestimulación; FG = fertilización granulada; PV: Precio de venta; IT: Ingresos totales; Rend: rendimiento; CT: Costos totales; CF: Costos fijos; CV: Costos variables; IN: Ingresos netos; RBC: Relación beneficio/costo

DISCUSIÓN

Los resultados logrados con los diferentes tratamientos de fertilización y bioestimulación, indican que la fertilización en forma líquida fue más eficiente para maíz choclo de temporal o seco con respecto a la fertilización convencional (granulada en banda superficial), lo cual demuestra que en condiciones ambientales donde la agricultura depende de las lluvias y no existe posibilidad de aplicar riego complementario cuando las precipitaciones se ausentan momentáneamente, la fertilización líquida es más conveniente que la granulada para un mayor aprovechamiento de los nutrientes. Además, la bioestimulación, independientemente si la fertilización es líquida o granulada, promovió un mayor potencial de rendimiento, eficiencia agronómica de nitrógeno y rentabilidad económica frente a la fertilización convencional sin bioestimulación. En este contexto, resultados obtenidos por Arifin [27] reportó un rendimiento de hasta 9,10 t ha⁻¹ y un mayor ingreso económico en maíz con fertilización líquida NPK, con respecto a los tratamientos



de fertilización granulada y control, que lograron 7,57 y 6,54 t ha⁻¹, respectivamente, además de haber generado menores ingresos económicos. Por su parte, los resultados obtenidos por Ren et al. [28] revelaron que la aplicación de fertilizantes nitrogenados líquidos aumentó el rendimiento de grano e índice de cosecha del maíz en un 9,1 y 5,5 %, respectivamente, en comparación a la urea convencional. La fertilización líquida también aumentó el factor parcial de productividad, la eficiencia agronómica del nitrógeno y su tasa de recuperación en un 9,1, 19,8 y 31,2 %, respectivamente; en contraste con las del tratamiento con urea granulada [28]. En esta misma línea, los resultados observados por Motasim et al. [29] reportaron que la aplicación de fertilizantes nitrogenados líquidos en tres fracciones (10, 40 y 65 días después de la siembra) fue más efectiva que el fertilizante granulado para incrementar el crecimiento, el rendimiento y el uso eficiente de N (UEN) en maíz. Además, con fertilización líquida, el rendimiento del maíz fue de 6,77 t ha⁻¹, el UEN fue del 72,82 %, en comparación con el fertilizante granulado que produjo rendimientos y UEN significativamente menores [29]. En otra experiencia semejante, Budiono et al. [35] reportaron que la fertilización líquida NPK produjo un efecto sobre el rendimiento del maíz dulce comparable a la fertilización NPK convencional, por lo que, bajo condiciones de baja humedad superficial del suelo, podría ser implementada como alternativa tecnológica.

Nuestros resultados se aproximan a los descritos por otros autores en cultivos de trigo y caña de azúcar. En este contexto, Walsh y Christiaens [36] concluyeron que la fertilización líquida resultó ser la fuente fertilizante más adecuada para los sistemas de cultivo de trigo en secano, en comparación con la fertilización granulada convencional. Por su parte, Da Silva et al. [37] demostraron que, en caña de azúcar, la aplicación de fuentes líquidas de N incorporadas al suelo produjo rendimientos de entre 96 a 98 t ha⁻¹, en comparación con la aplicación superficial granulada y tratamiento control, que produjeron rendimientos de 91 y 75 t ha⁻¹, respectivamente. Resultados relacionados también fueron descritos por Erenoğlu y Dündar [38], quienes informaron que la fertilización líquida aumentó la eficiencia de P y rendimiento de biomasa en plantas de trigo, en comparación con la fertilización granulada. En otro estudio reciente realizado en caña de azúcar, se determinó que el fertilizante líquido promovió un rendimiento de tallos de caña de azúcar 25 % mayor en comparación con el fertilizante sólido en la temporada de cultivo con lluvias bajas, mientras que, en la temporada de cultivo con lluvias normales, no hubo diferencias entre tratamientos [39].

Los resultados ya descritos sugieren que cuando no existe suficiente humedad en el suelo que garantice la solubilidad y disponibilidad de los fertilizantes colocados en banda superficial, sería más conveniente el uso de soluciones líquidas para la fertilización del maíz en secano, lo cual es muy recurrente en zonas maiceras de Manabí, donde se realizó este estudio. En este sentido, Bogusz et al. [22] reportaron que la forma líquida de los fertilizantes garantiza una mayor disponibilidad y distribución de los nutrientes, principalmente en períodos de sequía. Además, estos mismos autores concluyeron que la aplicación de fertilizantes diluidos se justifica desde el punto de vista económico. De igual manera, Motasim et al. [23] reportaron que el uso de fertilizante líquido es una tecnología eficaz para mejorar el uso eficiente de nutrientes, al aumentar la disponibilidad, absorción, y disminuir pérdidas.

En cuanto a los resultados obtenidos con los tratamientos de bioestimulación, son similares a los logrados por Atta et al. [40], quienes reportaron que el rendimiento del



maíz con aplicación de bioestimulantes superó significativamente al control en un 26 %. Los resultados obtenidos también son próximos a los alcanzados por Ali et al. [41], que con la aplicación de ácidos húmicos incrementaron el rendimiento del maíz en un 41 %, con respecto al control, bajo condiciones de estrés hídrico. Por su parte, Khan et al. [42] evidenciaron un aumento en el rendimiento de maíz del 86 % con la aplicación de ácidos húmicos, con relación al tratamiento control. Resultados semejantes fueron descritos por Kapela et al. [43], quienes informaron aumentos de rendimiento de entre 0,14 a 0,68 t ha⁻¹ con aplicación de bioestimulantes, en comparación al tratamiento sin bioestimulación. De forma similar, Martínez et al. [31] reportaron incrementos de rendimiento en maíz de entre 7,9 a 11,4 % con aplicación de bioestimulantes, en contraste con el tratamiento control sin bioestimulantes. En trabajos de investigación desarrollados por Li et al. [44], se concluyó que el uso combinado de bioestimulantes en maíz aumentó el UEN en un rango de 11,60 % a 22,57 % en comparación con el tratamiento de fertilización convencional, y de 11,78 % a 22,75 % en comparación con el tratamiento de fertilización convencional + cobertera. Los resultados descritos en nuestro estudio y en trabajos anteriores, confirman que el uso de bioestimulantes para complementar la nutrición del maíz, es una alternativa eficiente desde lo agronómico y económico, donde se logran incrementos de rendimiento en más del 10 % en maíz, con relación al manejo convencional. En este sentido, el uso de bioestimulantes es una de las estrategias sostenibles para lograr el equilibrio entre el aumento de la productividad del maíz y la protección de los ecosistemas maiceros [32]. El efecto positivo de los bioestimulantes, se debe a los componentes orgánico-minerales que aportan, promoviendo así mayor crecimiento de raíces, mayor absorción y uso eficiente de nutrientes, mayor actividad fotosintética y metabólica, mejor tolerancia al estrés hídrico y por ende mayor uso eficiente del agua, más aún en zonas de secano [45, 26, 44].

CONCLUSIONES

Bajo condiciones de secano o temporal, la fertilización en forma líquida fue más efectiva que la fertilización convencional o granulada, con un incremento promedio en rendimiento del 13,78 %. La fertilización en forma líquida logró mayor rentabilidad económica por cada dólar invertido con respecto a la fertilización granulada convencional, con un incremento del 15,38 %. La fertilización líquida también logró mayor eficiencia agronómica de N, produciendo un aumento del 21,56 % en rendimiento de mazorcas por cada kg de N aplicado, frente a la fertilización granulada convencional, por lo que, bajo condiciones de secano, sería más conveniente su uso. La aplicación de bioestimulantes como complemento a la fertilización potenció significativamente el rendimiento, la eficiencia agronómica de N y la rentabilidad del cultivo, con respecto a la fertilización convencional sin bioestimulación, independientemente de si la fertilización usada sea líquida o granulada. Con estos resultados podemos recomendar que, bajo condiciones de secano de Manabí, donde se produce maíz para consumo en choclo, es conveniente aplicar la fertilización de forma líquida en combinación con bioestimulantes, especialmente cuando se ausentan las lluvias, mientras que, bajo condiciones normales de lluvias, la fertilización granulada puede ser suficiente y la más conveniente desde el punto de vista económico.



AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecemos a la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López, por haber financiado parte de esta investigación a través del proyecto institucional "Alternativas tecnológicas para potenciar la conservación del suelo y la producción agrícola de ladera y secano en Manabí" (CUP 386888), que se ejecuta en la institución tal como consta en la Secretaría de Planificación del Estado Ecuatoriano. Además, agradecen a la Red Latinoamericana del Maíz y al Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo CYTED (proyecto Tech Maíz) por fomentar el uso y la difusión de tecnologías sostenibles para el cultivo de maíz en las Américas.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Vicente Antonio Vera Bravo y Geoconda López Álava desarrollaron la metodología y realizaron el trabajo de campo; Benny Avellán Cedeño y Galo Cedeño García concibieron la investigación, diseñaron el modelo, corrieron los análisis y apoyaron en la redacción del manuscrito; Sofía del Rocío Velázquez Cedeño y José Luis Zambrano Mendoza apoyaron en la redacción del manuscrito y revisaron críticamente el contenido intelectual del mismo.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no existe conflicto de interés.

REFERENCIAS

- [1] Erenstein, O., Jaleta, M., Sonder, K., Mottaleb, K., & Prasanna, B. (2022). Global maize production, consumption and trade: trends and implications. *Food Security* 14(5), 1295–1319. <https://doi.org/10.1007/s12571-022-01288-7>
- [2] Analuisa, I., Jimber del Río, J., Fernández, J., & Vergara, A. (2023). La cadena de valor del maíz amarillo duro ecuatoriano. Retos y oportunidades. *Lecturas de Economía*, 98, 231-262. <https://doi.org/10.17533/udea.le.n98a347315>
- [3] Alarcón, D., Limongi, J., Zambrano, E., & Navarrete, B. (2019). Desarrollo de una variedad de maíz tropical de grano blanco con calidad de proteína para consumo en fresco. *Avances en Ciencias e Ingenierías*, 11(17), 30-39. <https://doi.org/10.18272/aci.v11i1.1101>
- [4] Eguez, J., Pintado, P., Ruilova, F., Zmabrano, J., Villavicencio, J., Caicedo, M., Alarcón, D., Zambrano, E., Limongi, J., Yáñez, C., Narro, L., & San Vicente, F. (2019). Desarrollo de un híbrido de maíz de grano blanco para consumo en fresco en Ecuador. *Avances en Ciencias e Ingenierías*, 11(17), 46-53. <https://doi.org/10.18272/aci.v11i1.1102>
- [5] MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería). (2022). Estado del cultivo de maíz amarillo en el Ecuador. *Boletín situacional cultivo de maíz amarillo*. Quito, Ecuador. <http://sipa.agricultura.gob.ec/index.php/maiz/boletines-situacionales-maiz-ecuador>
- [6] Jiménez, S., Castro, L., Yépez, J., & Wittmer, C. (2012). El impacto del cambio climático en la agricultura de subsistencia del Ecuador. *Avances de Investigación*, 66: 1 – 92. <https://www.fundacioncarolina.es/wp-content/uploads/2014/08/Al66.pdf>
- [7] Thielen, D., Cevallos, J., Erazo, T., Zurita, I., Figueroa, J., Velázquez, E., Matute, N., Quintero, J., & Puche, M. (2016). Dinámica espacio-temporal de las precipitaciones durante el evento de El Niño 97/98 en la cuenca de Río Portoviejo, Manabí, costa ecuatoriana del Pacífico. *Revista de Climatología*, 16, 35 – 50. <https://www.climatol.eu/reclim/reclim16c.pdf>
- [8] Pérez, R., Cabrera, E., & Hinostroza, M. (2018). The Irrigation Regime for Crops in Manabí, Ecuador: Climatological Study. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 27(1), 5 – 12. <http://scielo.sld.cu/pdf/rcta/v27n1/rcta01118.pdf>
- [9] Zambrano, E., Rivadeneira, J., & Pérez, M. (2018). Linking El Niño southern oscillation for early drought detection in tropical climates: The Ecuadorian coast. *Science of the Total Environment*, 643, 193–207. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.160>
- [10] INEC (2023). Módulo de información ambiental y tecnificación agropecuaria. Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. *Boletín técnico 2023*. https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Encuestas_Ambientales/Modulo_Ambiental_ESPAC/2023/DOC_TEC_MOD_AMB_ESPAC_2023_04.pdf
- [11] Miró, J., Estrela, M., Corell, D., Gómez, I., & Luna, M. (2023). Precipitation and drought trends (1952–2021) in a key hydrological recharge area of the eastern Iberian Peninsula. *Atmospheric Research*, 286, 106695. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2023.106695>
- [12] Speer, M., Hartigan, J., & Leslie, L. (2024). Machine learning identification of attributes and predictors for a flash drought in eastern Australia. *Climate*, 12(4), 49. <https://doi.org/10.3390/cli12040049>
- [13] Amisshah, S., Ankomah, G., Lee, R., Perry, C., Washington, B., Porter, W., Virk, S., Bryant, C., Vellidis, G., Harris, G., Cabrera, M., Franklin, D., Diaz-Perez, J., & Sintim, H. (2024). Assessing corn recovery from early season nutrient stress under different soil moisture regimes. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1344022. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1344022>
- [14] Siman, F., Andrade, F., & Passos, R. (2020). Nitrogen fertilizers and NH3 volatilization: effect of temperature and soil moisture. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 51(10). <https://doi.org/10.1080/00103624.2020.1763384>
- [15] Lisboa, M., Schneider, R., Sullivan, P., & Walter, T. (2020). Drought and post-drought rain effect on stream phosphorus and other nutrient losses in the Northeastern USA. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 28, 100672. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100672>
- [16] Mahmud, K., Panday, D., Mergoum, A., & Missaoui, A. (2021). Nitrogen losses and potential mitigation strategies for a sustainable agroecosystem. *Sustainability* (13), 2400. <https://doi.org/10.3390/su13042400>
- [17] Yao, Y., Dai, Q., Gao, R., Gan, Y., & Yi, X. (2021). Effects of rainfall intensity on runoff and nutrient loss of gently sloping farmland in a karst area of SW China. *PLoS ONE* 16(3), e0246505. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0246505>



- [18] Furtak, K., & Wolińska, A. (2023). The impact of extreme weather events as a consequence of climate change on the soil moisture and on the quality of the soil environment and agriculture – A review. *Catena*, 231, 107378. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107378>
- [19] IPNI (International Plant Nutrition Institute). (2012). 4R Plant nutrition manual: a manual for improving the management of plant nutrition, Metric Versión. (T.W. Bruulsema, P.E. Fixen, G.D. Sulewski, eds.), *International Plant Nutrition Institute, Norcross, GA, EE.UU.*
- [20] Plett, D., Ranathunge, K., Melino, V., Kuya, N., Uga, Y., & Kronzucker, H. (2020). The intersection of nitrogen nutrition and water use in plants: new paths toward improved crop productivity. *Journal of Experimental Botany* 71(15), 4452–4468. <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa049>
- [21] Weeks, J., & Hettiarachchi, G. (2019). A review of the latest in phosphorus fertilizer technology: *Possibilities and Pragmatism*. *Journal of Environmental Quality*, 48, 1300–1313. <https://doi.org/10.2134/jeq2019.02.0067>
- [22] Bogusz, P., Rusek, P., & Brodowska, M. (2021). Suspension fertilizers: how to reconcile sustainable fertilization and environmental protection. *Agriculture*, 11(10), 1008. <https://doi.org/10.3390/agriculture11101008>
- [23] Motasim, A., Samsuri, A., Sukor, A., & Amin, A. (2022a). Split application of liquid urea as a tool to nitrogen loss minimization and NUE improvement of corn – A review. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 82 (4), 645–657. <https://doi.org/10.4067/S0718-58392022000400645>
- [24] Franzoni, G., Cocetta, G., Prinsi, B., Ferrante, A., & Espen, L. (2022). Biostimulants on crops: their impact under abiotic stress conditions. *Horticulturae*, 8, 189. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8030189>
- [25] Mandal, S., Anand, U., López-Bucio, J., Manoj Kumar, R., Kumar Lal, M., Kumar Tiwari, R., & Dey, A. (2023). Biostimulants and environmental stress mitigation in crops: A novel and emerging approach for agricultural sustainability under climate change. *Environmental Research*, 233, 116357. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116357>
- [26] Luiz, G., Ferreira, S., Lustosa, R., Dos Santos, OF., Vendruscolo, E., Jacinto de Oliveira, J., do Nascimento de Araújo, T., Mubarak, K., Finatto, T., & AbdElgawad, H. (2023). Biostimulants in corn cultivation as a means to alleviate the impacts of irregular water regimes induced by climate change. *Plants*, 12(13), 2569. <https://doi.org/10.3390/plants12132569>
- [27] Arifin, Z. (2019). The effect of liquid NPK fertilizing on corn plants. *International Conference on Biology and Applied Science (ICOBAS)*. *AIP Conference Proceedings*, 2120 (1). <https://doi.org/10.1063/1.5115617>
- [28] Ren, B., Guo, Y., Liu, P., Zhao, B. & Zhang, J. (2021). Effects of urea-ammonium nitrate solution on yield, n_2o emission, and nitrogen efficiency of summer maize under integration of water and fertilizer. *Frontiers in Plant Science*, 12, 700331. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.700331>
- [29] Motasim, A., Samsuri, A., Sukor, A., & Amin, A. (2022b). Effects of liquid urea application frequency on the growth and grain yield of corn (*Zea mays* L.). *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 53(17), 2245–2256. <https://doi.org/10.1080/00103624.2022.2071435>
- [30] Kapela, K., Sikorska, A., Niewęglowski, M., Krasnodębska, E., Zarzecka, K., & Gugala, M. (2020). The impact of nitrogen fertilization and the use of biostimulants on the yield of two maize varieties (*Zea mays* L.) cultivated for grain. *Agronomy*, 10(9), 1408. <https://doi.org/10.3390/agronomy10091408>
- [31] Martínez, A., Zamudio, B., Tadeo, M., Espinosa, A., Cardoso, J., & Vázquez, M. (2022). Rendimiento de híbridos de maíz en respuesta a la fertilización foliar con bioestimulantes. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 13(2), 289–301. <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i2.2782>
- [32] Ocwa, A., Mohammed, S., Mousavi, S., Illés, A., Bojtór, C., Ragán, P., Rátonyi, T., & Harsányi, E. (2024). Maize grain yield and quality improvement through biostimulant application: a systematic review. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 1–41. <https://doi.org/10.1007/s42729-024-01687-z>
- [33] Ayvar-Serna, S., J. F. Díaz-Nájera, M. Vargas-Hernández, A. Mena-Bahena, M. A. Tejeda-Reyes & Z. Cuevas-Apresa. (2020). Profitability of grain and fodder production systems of corn hybrids, with biological and chemical fertilization in dry tropic. *Terra Latinoamericana* 38(1), 9–16. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i1.507>
- [34] García, J., & Espinosa, J. (2009). Efecto del fraccionamiento del nitrógeno en la productividad y en la eficiencia agronómica de macronutrientes en maíz. *Informaciones agronómicas*, 72, 1 – 5. [http://www.ipni.net/publication/ia-lahp.nsf/0/F6C2CDE6735C18CF852579A0006B1E93/\\$FILE/Efecto%20del%20Fraccionamiento%20de%20Nitr%C3%B3geno%20en%20la%20Productividad%20.....pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-lahp.nsf/0/F6C2CDE6735C18CF852579A0006B1E93/$FILE/Efecto%20del%20Fraccionamiento%20de%20Nitr%C3%B3geno%20en%20la%20Productividad%20.....pdf)



- [35] Budiono, R., Asnita, R., Noerwijati, K., Gamawati, P., & Anwar, S. (2023). Sweet corn growth and productivity on several levels dosage of liquid NPK fertilizer. *E3S Web of Conferences*, 432, 00031. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202343200031>
- [36] Walsh, O., & Christiaens, R. (2016). Relative efficacy of liquid nitrogen fertilizers in dryland spring wheat. *International Journal of Agronomy*, 2016, 6850672. <https://doi.org/10.1155/2016/6850672>
- [37] Da Silva, M., Junqueira, H., & Graziano, P. (2017). Liquid fertilizer application to ratoon cane using a soil punching method. *Soil and Tillage Research*, 165, 279–285. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.08.020>
- [38] Erenoglu, E., & Dündar, S. (2020). Application of liquid phosphorus fertilizer improves the availability of phosphorus in calcareous soils. *Applied Ecology and Environmental Research*, 18, 3615–3626. http://dx.doi.org/10.15666/aeer/1802_36153626
- [39] Castro, S., Coelho, A., Castro, S., Souza Chiachia, T., Castro, R., & Lemos, L. (2023). Fertilizer source and application method influence sugarcane production and nutritional status. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1099589. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1099589>
- [40] Atta, M., Abdel-Lattif, H., & Absy, R. (2017). Influence of biostimulants supplement on maize yield and agronomic traits. *Bioscience Research*, 14(3), 604–615.
- [41] Ali, S., Jan, A., Manzoor, S., Sohail, A., Khan, A., Khan, M., Inamullah, Z., Zhang, J., & Daur, I. (2018). Soil amendments strategies to improve water-use efficiency and productivity of maize under different irrigation conditions. *Agricultural Water Management*, 210, 88–95. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.08.009>
- [42] Khan, S., Khan, S., Qayyum, A., Gurmani, A., Khan, A., Khan, S., Ahmed, W., Mehmood, A., & Amin, B. (2019). Integration of humic acid with nitrogen yields an auxiliary impact on physiological traits, growth and yield of maize (*Zea mays* L.) Varieties. *Applied Ecology & Environmental Research*, 17(3), 6783–6799. https://doi.org/10.15666/aeer/1703_67836799
- [43] Kapela, K., Sikorska, A., Niewęglowski, M., Krasnodębska, E., Zarzecka, K., & Gugala, M. (2020). The impact of nitrogen fertilization and the use of biostimulants on the yield of two maize varieties (*Zea mays* L.) Cultivated for Grain. *Agronomy*, 10(9), 1408. <https://doi.org/10.3390/agronomy10091408>
- [44] Li, J., Ma, H., Ma, H., Lei, F., He, D., Huang, X., Yang, H., & Fan, G. (2023). Comprehensive effects of n reduction combined with biostimulants on n use efficiency and yield of the winter wheat–summer maize rotation system. *Agronomy*, 13(9), 2319. <https://doi.org/10.3390/agronomy13092319>
- [45] Capo, L., Sopegno, A., Reyneri, A., Ujvári, G., Agnolucci, M., & Blandino, M. (2023). Agronomic strategies to enhance the early vigor and yield of maize part II: the role of seed applied biostimulant, hybrid, and starter fertilization on crop performance. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1240313. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1240313>

La Rematriación de maíz (*Zea mays* L.) nativo para el pueblo indígena Kamëntsá-biyá, en el departamento del Putumayo, Colombia

John F. Hernández Nopsa^{1*}, Juliene A. Barreto Rojas², Manuel A. Guzmán Hernández³, Karen V. Osorio Guerrero¹, Luis F. Rincón Manrique⁴, Julio Ramírez Durán^{1*}

¹ Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), Departamento de Semillas, Bogotá, Colombia.

² AGROSAVIA, Centro de Investigación Palmira, Palmira, Valle del Cauca, Colombia.

³ AGROSAVIA, Centro de Investigación La Selva, Rionegro, Antioquia, Colombia.

⁴ AGROSAVIA, Centro de Investigación Obonuco, Pasto, Nariño, Colombia.

*Autores para correspondencia / corresponding authors, e-mail: jramirezdz@agrosavia.co; jhernandezn@agrosavia.co

The Rematriation of native corn (*Zea mays* L.) for the Kamëntsá-biyá Indigenous people, in the department of Putumayo, Colombia

Abstract

The most important challenges that humanity faces today are biodiversity loss and erosion of germplasm resources, both highly enhanced by climate change, climate variability, and anthropogenic causes. These phenomena were identified in local production seed systems (SLS) and local agricultural communities such as the native indigenous people Kamëntsá-biyá in Putumayo, Colombia, particularly in corn. The intercultural dialogue allowed AGROSAVIA to reach different agricultural communities and develop strategies to strengthen SLS and improve food security and food sovereignty locally. To mitigate the loss of corn landraces, AGROSAVIA prepared a strategy called Seed Rematriation, a strategy developed jointly with the Kamëntsá-biyá community. To the Kamëntsá-biyá people, the strengthening of their agricultural system (called *jajañ*) begins with rescuing corn landraces that were lost. Human factors or climate variability are the most common causes of this disappearance. Seed Rematriation reinforces the agricultural, cultural, and food bases of local communities. To rescue corn seed, we use accessions stored in the Colombian Germplasm Banks for Food and Agriculture (BGAA). We identified and increased ten corn accessions collected in the Putumayo and stored more than three decades ago. We agreed with the Kamëntsá-biyá people to return this seed to their community. The seed increase was done at the AGROSAVIA research center La Selva (Rionegro, Antioquia). La Selva has optimal agroclimatic conditions to increase corn seed from the Putumayo area. Seed increase was done using a plot under controlled pollination per accession, where we finally obtained quality seeds of each accession. Simultaneously, we strengthened the Kamëntsá-biyá Seed Guardian Network so that they could increase, produce, and store corn seeds using their cultural practices. Rematriation implies the conscious and respectful return of landraces or native seeds to their communities, with the recognition of their intrinsic value and the preservation of cultural practices associated with their seeds. Rematriation is based on respect and cultural understanding and prioritizes community



Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /
Edited by:

María Gabriela Albán

Recibido /
Received:
30/06/2024

Aceptado /
Accepted:
19/08/2024

Publicado en línea /
Published online:
16/12/2024



participation during the strengthening of their agricultural production systems through interculturality. Finally, seed rematriation contributes to food security, food sovereignty, and food identity. It facilitates the conservation and rescue of agrobiodiversity using both *in situ* and *ex situ* strategies. Here, we describe the rematriation principles and depict their actions to articulate rescue, conservation, restoration, and increase processes carried out jointly between Kamëntsá-biyá and AGROSAVIA with the BGAA. Thus, we enrich the delivery of seed to communities and strengthen the capacities of the SLS.

Keywords: corn, plant genetic resources, seed bank, agrobiodiversity, food security, food sovereignty, quality seed.

Resumen

La pérdida de la agrobiodiversidad y la erosión de los recursos fitogenéticos son fenómenos acentuados recientemente por el impacto de la variabilidad climática y de acciones antropogénicas. Estos fenómenos fueron identificados en sistemas locales de producción de semilla (SLS) y en comunidades agrícolas locales, como el pueblo indígena Kamëntsá-biyá en el Putumayo, Colombia, para maíz. El diálogo intercultural le permitió a AGROSAVIA acercarse a comunidades agrícolas y construir estrategias para fortalecer los SLS, y simultáneamente, mejorar la seguridad y soberanía alimentarias locales. Una estrategia para mitigar la pérdida de maíces nativos es la que denominamos “Rematriación”, y que desarrollamos con los Kamëntsá-biyá. Para ellos, el fortalecimiento de su sistema de producción agrícola —denominado *jajañ*— inicia con la recuperación de maíces nativos desaparecidos por factores antropogénicos o climáticos. La “Rematriación” robustece su base agrícola, alimentaria y cultural. Para recuperar los maíces desaparecidos empleamos las accesiones en los Bancos de Germoplasma para la Alimentación y la Agricultura (BGAA) de Colombia, que son administrados por AGROSAVIA. Allí identificamos diez accesiones recolectadas en el Putumayo y conservadas por más de tres décadas. Posteriormente, acordamos con los Kamëntsá-biyá incrementar estos materiales para retornarlos a la comunidad. Este incremento se ejecutó en el Centro de Investigación La Selva, de AGROSAVIA (Rionegro, Antioquia), cuyas condiciones agroclimáticas son óptimas para multiplicar maíces de clima frío moderado, además de ser similares a las del Putumayo. Establecimos una parcela exclusiva de incremento bajo polinización controlada por accesión y obtuvimos semilla de calidad. Paralelamente, fortalecimos la Red de Guardianes de Semillas Kamëntsá-biyá para que multipliquen, produzcan y conserven —bajo sus prácticas culturales— la semilla retornada. La “Rematriación” es el retorno consciente y respetuoso de semillas nativas a las comunidades, con el reconocimiento de su valor intrínseco y la preservación de las prácticas culturales asociadas a las semillas. La “Rematriación” se fundamenta en el respeto y la comprensión cultural, y prioriza la participación comunitaria durante el fortalecimiento de los sistemas de producción agrícolas propios desde la interculturalidad. Finalmente, esta contribuye a la soberanía, seguridad e identidad alimentarias de las comunidades. Facilita la conservación y el rescate de la agrobiodiversidad con procesos *ex situ* e *in situ*. Aquí, describimos los principios de la Rematriación y detallamos las acciones hechas con los Kamëntsá-biyá para articular la conservación en el BGAA y la recuperación de semillas de las comunidades. Así, enriquecemos la entrega de semilla a las comunidades y fortalecemos las capacidades de los SLS.

Palabras clave: maíz, recursos fitogenéticos, bancos de semillas, agrobiodiversidad, seguridad alimentaria, soberanía alimentaria, calidad de semilla.



INTRODUCCIÓN

Colombia es el segundo país más biodiverso del mundo y ostenta, además, el segundo lugar con mayor biodiversidad de plantas con flores; la región andina es la que tiene mayor concentración de biodiversidad [1], con un estimado de 30.736 especies vegetales, y un sinnúmero de endemismos, lo que abre la puerta a muchas oportunidades tanto científicas como económicas [2]. Asimismo, Colombia posee una diversidad étnica y cultural enorme. En la nación colombiana habitan 115 pueblos indígenas de diversos orígenes y tradiciones lingüísticas y culturales, con una población autoreconocida como indígena de 1.905.617 personas, de las cuales el 64 % habita territorios colectivos legalizados. El resto de la población se localiza en centros urbanos o en zonas rurales dispersas. Los Kamëntsá-biyá, uno de los pueblos indígenas colombianos, ubicados en el valle de Sibundoy, Putumayo, contaban en el censo de 2018 con 7.521 habitantes [3, 4].

La agrobiodiversidad, o biodiversidad agrícola, es la diversidad de los sistemas agrícolas, e incluye desde genes, variedades y especies, hasta las prácticas agrícolas y la composición del paisaje [5]. En palabras más simples, es la gama de especies diferentes de plantas silvestres y domesticadas, animales, hongos y microorganismos que se encuentran en los ecosistemas agrícolas y en los sistemas rurales que producen alimentos y materias primas [6].

Sin embargo, la pérdida y disminución de la agrobiodiversidad —y de la biodiversidad misma— es uno de los enormes desafíos que la humanidad enfrenta actualmente. Este desafío es causado por los efectos directos de la variabilidad y el cambio climático (CVC), o indirectos, como el incremento o el cambio en las dinámicas de plagas y patógenos promovidos también por el CVC y el transporte global [6, 7, 8, 9, 10]. Infortunadamente, se suman otras causas de tipo antropogénico como la deforestación, el uso inadecuado de suelos, las industrias extractivas como la minería, los incendios, la producción agropecuaria (particularmente la ganadería), la sobreexplotación de recursos naturales, el consumo de leña, la introducción de especies exóticas e invasoras, y los conflictos sociales, entre muchas más [2, 11].

Las sociedades humanas dependen altamente de la naturaleza, ya que la biodiversidad es el soporte de una multiplicidad de servicios ambientales, los cuales se agrupan en cuatro tipos: de aprovechamiento (leña, plantas medicinales, peces); culturales (belleza de paisajes, sitios sagrados, valores espirituales); reguladores (funciones vitales de los ecosistemas como la regulación del clima, de la erosión, la protección frente a desastres naturales); y de apoyo (procesos esenciales para el funcionamiento de los ecosistemas como la formación de suelos y crecimiento de plantas) [11]. Dependemos plenamente de la naturaleza y su biodiversidad para el mantenimiento de la calidad del aire, del suelo, la obtención de agua fresca, y la agricultura, puesto que el 75 % de los cultivos mundiales dependen de la polinización animal [12].

La alteración o pérdida de la agrobiodiversidad limitaría su uso en procesos fundamentales para la sociedad, como la producción de alimentos y el fitomejoramiento [13]. Sin embargo, existe un deterioro ambiental que está destruyendo los ecosistemas, cuyas consecuencias se reflejan en el agotamiento de los recursos naturales, la extinción de las especies, la pérdida de agrobiodiversidad, la contaminación del agua y del aire, y en la aparición de enfermedades emergentes y reemergentes, que afectan no solo a los humanos, sino a todas las especies [11].



Los sistemas de semilla son los canales a través de los cuales los agricultores pueden adquirir el material vegetal, ya sea por fuera o en interacción con la industria de semillas, y tienen diferentes incentivos para escoger una especie agrícola, una variedad o un material sobre otro [14]. Los sistemas de semilla involucran tanto elementos biofísicos como a todas las partes interesadas que sostienen el sistema, es decir, elementos socioeconómicos [15].

Generalmente, los sistemas de semilla se dividen en dos tipos. El primero, el Sistema Local de Semilla, en donde los agricultores —quienes son los actores fundamentales del manejo de los recursos fitogenéticos locales— guardan, producen, intercambian, compran, venden, acondicionan y seleccionan semillas (nativas y mejoradas) de múltiples especies agrícolas en una comunidad o región [16]. Es decir, por medio de diversas interacciones y procesos, producen y conservan semillas de interés local para su propia comunidad. En muchos casos, la producción de semilla no es especializada e integra la producción para autoconsumo y para venta de distintas especies (v. g., granos, raíces y tubérculos), e incluye guardar material vegetal para la próxima siembra, así como la difusión de semilla a otros campesinos, frecuentemente dentro de su comunidad [17].

El segundo es el denominado Sistema Formal de Semilla, caracterizado por una producción y distribución de semilla de variedades aprobadas (certificadas) con un estricto control de calidad [17]. El sistema formal es frecuentemente liderado por el comercio o el Estado [18]. En Colombia, el sistema formal está liderado por el Instituto Colombiano Agropecuario, ICA. En ocasiones, a los sistemas locales de semilla, liderados por los agricultores, se les refiere como “sistemas informales”. Este término causa confusión, ya que en los contextos locales se les atribuye cierta formalidad, porque siguen ciertas normas y reglas sociales [5, 18]. Por ello, es más apropiado denominarlos sistemas locales. Comparativamente, existen menos estudios económicos de los sistemas locales [14].

En conjunto, los sistemas de semilla —que están compuestos por los sistemas locales y los formales— determinan la disponibilidad de semillas para todos los agricultores. Estos dos sistemas son interdependientes y se permean mutuamente [18], y son importantes para que las comunidades agricultoras fortalezcan su producción de semillas, de alimentos y de otros productos agrícolas.

La semilla, como eje fundamental de los sistemas agrícolas, debe cumplir con unas condiciones mínimas de calidad que beneficien al productor, al medio ambiente y a la propia comunidad o clientela de la semilla. La calidad de la semilla —definida por sus atributos físicos, fisiológicos, genéticos y sanitarios [19, 20]— le permite al agricultor conocer el potencial fisiológico, la sanidad, la pureza, la viabilidad, la germinación, el vigor y la uniformidad de un lote de semillas. La calidad de la semilla es determinante para el inicio y posterior obtención de cultivos exitosos, productivos, y libres de enfermedades y plagas transmitidas vía semilla, y asimismo para lograr su potencial productivo a campo [21, 22, 23].

Los bancos de germoplasma de Colombia son los sitios que albergan las colecciones biológicas, que protegen la agrobiodiversidad y que garantizan su viabilidad, distribución y uso [24]; y con ellos se previenen y mitigan procesos de desaparición o extinción de especies, o de algunas de sus poblaciones. Además del uso que tradicionalmente le dan los fitomejoradores, el aprovechamiento de los bancos se ha extendido a la conservación, a



la distribución de la biodiversidad, y a comunidades más amplias de usuarios [25]. El origen de los —hoy llamados— Bancos de Germoplasma para la Alimentación y la Agricultura (BGAA) data de finales de la década de los treinta en el siglo XX, cuando se establece la política de recursos genéticos, y es en los cuarenta cuando inician las recolectas y colecciones de especies vegetales con potencial agrícola, como la papa y el maíz [26].

Posteriormente, las colecciones fueron custodiadas y administradas por el DIA (Departamento de Investigación Agrícola) y luego por el ICA (Instituto Colombiano Agropecuario) hasta 1994 [27]. Ese mismo año se fundó la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica), hoy AGROSAVIA, con funciones de investigación separadas del ICA; y simultáneamente se conformó el SBGNAA (Sistema de Bancos de Germoplasma de la Nación para la Alimentación y la Agricultura), y se le delegó a Corpoica su administración [26]. En 1996, el SBGNAA se organizó en tres bancos: el animal, el vegetal y el de microorganismos, a partir de los cuales se conformó el BGAA [28]. Actualmente, el BGAA es administrado por AGROSAVIA y se divide en el Banco de Germoplasma Animal (BGA), el Banco de Germoplasma de Microorganismos (BGM), y el Banco de Germoplasma Vegetal (BGV) [26]. Actualmente, el BGV conserva más de 30.000 accesiones de 275 especies [29].

El maíz (*Zea mays* L.) fue domesticado hace 9.000 años en el sur de México y tuvo una posterior domesticación en América del Sur [30, 31, 32]. Los primeros análisis de diversidad de maíz reconocieron 23 razas en Colombia, agrupadas en tres categorías: primitivas, introducidas e híbridas, las cuales se originaron por cuatro factores de evolución: aislamiento geográfico, hibridación interracial, hibridación con maíces contaminados con teocintle procedente de México e hibridación del maíz con el género *Tripsacum* [33, 34]. Un estudio posterior mantiene la existencia de las tres categorías, pero cambia el número de razas por categoría [35]. A mayo del 2024, Colombia en su BGV posee cerca de 6.000 accesiones de maíz, de las cuales 1.182 están clasificadas como criollas, provenientes de diferentes departamentos de Colombia.

Uno de los problemas serios que aqueja a la humanidad —junto con el CVC, la pérdida de la biodiversidad y la disminución de la agrobiodiversidad— es el hambre. Este problema se aborda desde tres enfoques: el técnico (la seguridad alimentaria), el reivindicativo (la soberanía alimentaria) y el jurídico (el derecho a la alimentación), enfoques que se han enriquecido mutuamente y que han complejizado la lucha contra el hambre [36]. Brevemente, la seguridad alimentaria establece que esta existe “cuando todas las personas tienen acceso físico y económico a suficientes alimentos inocuos y nutritivos para satisfacer sus necesidades alimenticias y sus preferencias en cuanto a alimentos a fin de llevar una vida activa y sana” [37]. La soberanía alimentaria se define como “el derecho de los pueblos de definir su propio sistema alimentario, sus políticas y estrategias sostenibles de producción, distribución y consumo de alimentos nutritivos, culturalmente adecuados y accesibles” [36]. Finalmente, el derecho humano a la alimentación adecuada se conoce como “el derecho a tener acceso, de manera regular, permanente y libre, sea directamente, sea mediante compra en dinero, a una alimentación cuantitativa y cualitativamente adecuada y suficiente, que corresponda a las tradiciones culturales de la población a que pertenece el consumidor y que garantice una vida física y psíquica, individual y colectiva, libre de angustias, satisfactoria y digna” [38].



Es muy importante destacar que las comunidades étnicas juegan un papel clave en la conservación de zonas biodiversas y culturalmente importantes [11]. Sin embargo, las comunidades agricultoras preservan y multiplican la agrobiodiversidad con sus prácticas, tierras, trabajo e intercambios [5, 39], pero no necesariamente con el objetivo final de la conservación [5]. Tradicionalmente, los sistemas locales de semilla mantienen la agrobiodiversidad, e intercambian semillas adaptadas para garantizar la tenencia de material de siembra para la próxima temporada [40]. Lugo-Castilla y otros plantean que las redes de intercambio de semillas de pequeños agricultores son fundamentales para la conservación local de la agrobiodiversidad y contribuyen a la seguridad alimentaria, particularmente con maíz [41]. La contribución de las redes de semillas de agricultores es esencial porque permiten el movimiento de semilla entre los agricultores y también entre la naturaleza, los mercados locales, las agencias nacionales de semilla, los centros de investigación, los agronegocios y los mercados agrícolas en el territorio; estas redes son abiertas, lo cual no implica que los flujos de semilla estén libres de obstáculos, puesto que las semillas tienen ciertos significados y costos sociales [18]. Existe una relación entre la agrobiodiversidad y la diversidad cultural, en donde las redes de intercambio de semillas están embebidas en la organización social de los agricultores [42].

El enfoque biocultural da una perspectiva más holística en la identificación e investigación de las interrelaciones complejas que existen entre los procesos ecológicos y las dinámicas culturales [43]. Los procesos bioculturales de conservación de semillas nativas y criollas implican la valoración de los sistemas tradicionales —de una comunidad local o étnica— en la conservación de los conocimientos asociados a los sistemas de semilla con el objeto de lograr un trabajo intergeneracional [44].

La rematriación de semillas nativas es el reintegro de estas semillas a sus comunidades de origen, desde las instituciones que las almacenan o guardan [45]. Sin embargo, el concepto indígena de rematriación reclama patrimonios ancestrales, espirituales, culturales y conocimientos indígenas, y es un concepto que se contrapone al de repatriación y que proviene de una postura patriarcal que se asocia con el colonialismo [45].

MATERIALES Y MÉTODOS

El Pueblo Kamëntsá-biyá y la pérdida de maíces

El pueblo Kamëntsá-biyá es originario del Valle del Sibundoy, en el piedemonte amazónico. Este territorio es altamente biodiverso, lo que le ha permitido a los Kamëntsá-biyá construir y reproducir por generaciones todo un acervo de conocimientos sobre usos, aprovechamientos y cosmovisiones que constituyen su identidad. Sin embargo, la modernización de la sociedad y el desarrollo de la agricultura han llevado a un desplazamiento de las prácticas y conocimientos tradicionales debido al predominio de nuevos patrones de consumo y a la prevalencia de cultivos comerciales que ponen en riesgo la cultura local.

Los procesos de colonización, promovidos inicialmente por las misiones evangelizadoras y los procesos de ocupación del territorio por campesinos colonos a lo largo del siglo XX, han impulsado los sistemas productivos de frijol, arveja, diversos frutales y ganadería, orientados



a abastecer mercados regionales y nacionales. Esto ha generado una reconfiguración del territorio en la que ahora prevalecen paulatinamente los cultivos comerciales sobre los sistemas tradicionales de producción Kamëntsá-biyá, como el *jajañ*. Asimismo, se da una paulatina erosión de las prácticas productivas locales y del conocimiento y usos de las especies nativas. Como resultado, la comunidad identifica como problemáticas una mayor predilección por productos empaquetados y enlatados sobre los alimentos tradicionales, una disminución de las áreas sembradas con *jajañ* y una pérdida de semillas y plantas nativas.

AGROSAVIA adelantó en 2023 la iniciativa “Fortalecimiento de los Sistemas Territoriales de Innovación con enfoque diferencial con el resguardo Kamëntsá-biyá”, para empoderar a las comunidades locales en los procesos de gestión del territorio, con el apoyo del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. Con base en diálogos interculturales, que permitieron reconocer y validar conocimientos locales y ancestrales, se diagnosticaron e identificaron las demandas territoriales que requerían una intervención directa. De manera participativa se estableció una acción para el rescate, la conservación y la multiplicación de semillas nativas asociadas al *jajañ*.

Inicialmente, se identificó la importancia de la conservación y custodia de semillas locales y nativas por parte de los Kamëntsá-biyá. Si bien algunas familias de manera aislada mantienen las semillas en su sistema de producción tradicional —el *jajañ*—, es necesario que la conservación y custodia de dichas semillas sea comunitaria, lo que robustecería la preservación de estas. Igualmente, debe fortalecerse la producción e intercambio de semilla de calidad de dichos materiales, simultáneamente con los conocimientos asociados a estas semillas. Para ello, la comunidad conformó una “Red de Guardianes de Semilla” (*Enabuatambayëng jenay uakeknayëng*) bajo sus esquemas de trabajo colectivo agrupados en cuadrillas (*enabuatambayëng*), para promover la conservación, multiplicación e intercambio de semillas de calidad en la comunidad.

Paralelamente, la comunidad identificó la disminución de la diversidad de los maíces cultivados en su territorio. Con el modelo de producción comercial de maíz predominan los híbridos, cuya venta se convierte en una alternativa de ingresos para los periodos en los cuales no hay cosecha de frijol. Esto se suma a la disminución del consumo de maíces tradicionales por los cambios de dieta y a otros procesos sociales que han ocurrido en los últimos años. Como alternativa a esta situación, la comunidad ha decidido obtener semillas nativas de maíz para su multiplicación, consumo y conservación.

AGROSAVIA —como administradora del BGAA, que conserva una importante colección de germoplasma, incluidos maíces recolectados en el Alto Putumayo— acuerda con la comunidad reintroducir a sus territorios materiales de maíces perdidos o en riesgo de desaparición. Esta reintroducción, así como el posterior incremento comunitario de maíces, cuenta con el constante apoyo y seguimiento técnico de AGROSAVIA.

Diálogos interculturales con el pueblo Kamëntsá-biyá

Los dos primeros retos que tuvo AGROSAVIA, como institución científica y técnica, con el pueblo Kamëntsá-biyá fueron construir confianza mutua y dialogar para alinear las perspectivas institucionales e indígenas. Para allanar este camino, el acercamiento de AGROSAVIA al resguardo fue fundamental, ya que a partir del relacionamiento en



el territorio indígena —en donde se conoció la cotidianidad de sus habitantes, se compartieron sus costumbres, alimentos y bebidas— fuimos invitados a participar en algunas de sus prácticas tradicionales. Estos acercamientos, hechos en distintos espacios del resguardo y en diferentes fechas, siempre fueron respetuosos y permitieron una apertura mutua. Durante las primeras reuniones concertamos una hoja de ruta para identificar necesidades y proponer soluciones.

Un problema recurrentemente mencionado fue la desaparición de algunas de las semillas usadas tradicionalmente por los Kamëntsá-biyá —particularmente de maíces— por distintas razones, entre ellas el desinterés de algunos miembros de la comunidad por cultivarlas, el uso mayoritario de otros materiales de maíz, la facilidad de acceso a semillas comerciales, el desconocimiento de las técnicas y los procesos de conservación de semilla, la poca demanda de ciertas semillas, los problemas fitosanitarios, los cambios en las condiciones climáticas y los cambios acaecidos en el *jajañ*. La interacción de las anteriores variables condujo a la desaparición de algunos tipos de maíces en dicho territorio.

Una solución para mitigar la pérdida de maíces surgió a partir de las capacidades y experiencias que AGROSAVIA tiene en el Departamento de Semillas, en el Departamento de Agrobiodiversidad y en los BGAA, específicamente en el BGV. Propusimos identificar y seleccionar algunas accesiones de maíz recolectadas en el Valle del Sibundoy, Putumayo, para su incremento y posterior reintegro a la comunidad para su multiplicación y difusión a todos los miembros; es decir, rematriar semilla de maíz al pueblo Kamëntsá-biyá.

Pero la Rematriación propuesta y ejecutada por AGROSAVIA no es solo el acto de devolver la semilla; implica un acompañamiento antes, durante y después de la siembra de la semilla, así como un constante diálogo para fusionar el conocimiento técnico de producción de maíz de AGROSAVIA con las prácticas propias del *jajañ*, con el respeto de las tradiciones y la cultura Kamëntsá-biyá. Esta propuesta fue acogida y de esta manera se inició el proceso de Rematriación en Colombia liderado por AGROSAVIA.

En las reuniones y diálogos, se realizaron talleres del tipo “aprender haciendo” en temas fundamentales como la calidad de semilla [20, 46], los procesos de conservación de esta y los Bancos Locales de Semilla [6, 47, 48]. Estos temas fueron básicos en la apropiación del conocimiento y permitieron mejorar la producción y el almacenamiento de las semillas. De esta manera se fortalecieron las capacidades del sistema local de semilla. En estos talleres se trabajó específicamente con maíz y frijol, y con ejemplos de otras especies de reproducción sexual y asexual como guandul, plátano, cacao, papa, yuca, etc. [21, 49, 50]. En los talleres también se contó con la participación del ICA y del Servicio Nacional del Aprendizaje (SENA).

Material genético de maíz

Diez accesiones de maíz (Tabla 1) recolectadas en el Valle de Sibundoy, Putumayo, y conservadas en el BGAA, fueron tomadas para su incremento en campo y posterior Rematriación al pueblo Kamëntsá-biyá. Estas accesiones fueron transferidas mediante la firma de un Acuerdo de Entrega de Recurso Biológico emitido por AGROSAVIA, como garante y administrador de los recursos genéticos de Colombia.



TABLA 1. Identificación de las accesiones de maíz seleccionadas para la Rematriación al pueblo Kamëntsä-biyá, en el departamento de Putumayo, Colombia.

Accesión	Código BGAA*	Nombre común	Municipio	Altitud (m s. n. m.)	Color principal del grano
Putumayo 307	30402045	Mayo	Santiago	2.000	amarillo
Putumayo 317	30401418	Morocho	Santiago	2.050	amarillo
Putumayo 343	30400824	Capio	Sibundoy	2.000	blanco
Putumayo 344	Sin codificación	Capio	Sibundoy	2.000	blanco
Putumayo 345	30401419	Capio común	Sibundoy	2.000	amarillo
Putumayo 346	30401726	Capio	Sibundoy	2.000	blanco
Putumayo 359	30403656	No reportado	Sibundoy	No reportada	blanco
Putumayo 362	30403657	No reportado	Sibundoy	No reportada	naranja
Putumayo 364	30403658	No reportado	Sibundoy	No reportada	amarillo
Putumayo 374	30401729	Duro	Sibundoy	2.100	blanco

* Banco de Germoplasma para la Alimentación y la Agricultura (BGAA) de Colombia.
Fuente: Elaboración propia con base en el BGAA.

Ubicación del lote de incremento

Las accesiones fueron multiplicadas en el Centro de Investigación (C. I.) La Selva de AGROSAVIA; en Rionegro, Antioquia (6°7'51" N; 75°24'58" O), entre noviembre del 2023 y mayo del 2024. El C. I. La Selva se encuentra a 2.110 m s. n. m. en la zona de vida Bosque Húmedo Montano Bajo (bh-MB), de acuerdo con la clasificación de zona de vida propuesta por Holdridge [51]. Su temperatura media anual es de 17.1 °C, con una precipitación anual de 1.917 mm y HR de 78 %. Sus suelos pertenecen al orden *Andisols, Typic Fulvudands* [52], los cuales están formados sobre ceniza volcánica con altos contenidos de carbón orgánico (mayor al 5 %) y con moderada presencia de aluminio.

Siembra para incremento de semilla

Cada accesión fue sembrada en dos surcos de 25 m de largo, distanciados 0,8 m entre ellos. Las plantas fueron sembradas a 0,2 m entre sí, con una densidad de 62.500 plantas por hectárea, y con un área de 40 m² por parcela. La preparación del suelo para la siembra fue mecanizada y se emplearon arados de disco, cinceles, y surcador. En la siembra, de tipo manual, se plantaron 2 semillas por punto de siembra y se realizó un raleo o entresaque a los 20 días después de la emergencia. Durante la siembra se fertilizó —de acuerdo con las recomendaciones derivadas del análisis de suelo hecho— a 60 kg ha⁻¹ de fósforo (P₂O₅) en la forma de fosfato diamónico, 65 kg ha⁻¹ de nitrógeno (N) en la forma de urea y 42 kg ha⁻¹ de potasio (K₂O) en la forma de sulfato de potasio. Una segunda dosis de N y K₂O, compuesta por 38 kg ha⁻¹ cada una, fue aplicada 35 días después de la emergencia de las plantas. El manejo agronómico del cultivo fue principalmente manual, y se usaron algunos productos de síntesis química para el manejo de plagas limitantes como *Spodoptera frugiperda* Walker (Lepidoptera: Noctuidae).

Proceso de polinización controlada

La polinización fue controlada o asistida entre plantas al interior de cada una de las parcelas, para garantizar la pureza genética de las accesiones durante la multiplicación de la semilla. En la fase de prefloración, se eliminaron plantas fuera de tipo y se seleccionaron los individuos más vigorosos y de mejor desempeño para ser polinizados. El pedúnculo de la mazorca fue cubierto con una bolsa parafinada tipo *glassine* antes de la emergencia de los estigmas (Figura 1). Al inicio de la liberación de polen, se ejecutó la programación de polinización en campo: se cubrió la panoja y se recogió el polen con una bolsa de papel (tipo kraft). Al día siguiente, cada panoja donadora fue sacudida ligeramente para recoger el polen liberado y se retiró la bolsa cuidadosamente. En las plantas seleccionadas, las mazorcas con estigmas lo suficientemente expuestos —pero protegidos— fueron polinizadas al depositar directamente el polen colectado sobre los estigmas. Inmediatamente después se cubrieron con una bolsa de papel.



FIGURA 1. Polinización controlada de las accesiones de maíz a incrementar. **A** aislamiento de la inflorescencia femenina con bolsas tipo *glassine*, **B** recolección del polen con bolsas tipo kraft, **C** fecundación de los estigmas con el polen seleccionado, **D** inflorescencias femeninas polinizadas y aisladas.



Caracterización preliminar morfoagronómica de las accesiones

Durante el desarrollo del cultivo se emplearon 28 variables del descriptor del IBPGR [53], para caracterizar morfológica y agronómicamente las accesiones, en al menos 20 plantas y/o mazorcas (Tabla 2).

TABLA 2. Descriptores de maíz del IBPGR empleados en este estudio.

Variable	Descripción
Floración masculina (días)	Se evaluó desde el inicio de la floración. Se contaron las plantas de cada hilera y cuando el 50 % de estas emitieron polen, se contabilizaron los días transcurridos desde la siembra hasta ese momento.
Floración femenina (días)	Se evaluó desde el inicio de la floración. Se contaron las plantas de cada hilera y cuando el 50 % de estas presentaron estigmas receptivos, se contabilizaron los días transcurridos desde la siembra hasta dicho momento.
Altura de la planta (cm)	Transcurridas tres semanas desde el final de la floración, se midió la distancia desde el nivel del suelo hasta la inserción de la hoja bandera, en veinte plantas por accesión.
Altura de la mazorca (cm)	Se midió la distancia desde el nivel del suelo hasta la inserción de la primera mazorca, en veinte plantas por accesión.
Coloración por antocianinas en raíces adventicias	Se registró el color de las raíces adventicias con base en la siguiente escala: (1) ausente, (3) media y (5) fuerte. Los valores (3) y (5) corresponden a colores morado, rojo o café.
Color del tallo	Se indicaron hasta 3 colores del tallo ordenados por su frecuencia, en el momento de la floración. Se observó entre las 2 mazorcas más altas y se empleó esta escala: (1) verde, (2) rojo sol, (3) rojo, (4) morado y (5) café.
Acame de raíz	Se registró el número de plantas acamadas de raíz, dos semanas antes de la cosecha. Luego se expresó en porcentaje, según el número de plantas en la parcela.
Acame de tallo	Se registró el número de plantas acamadas de tallo, dos semanas antes de la cosecha. Luego se expresó en porcentaje, según el número de plantas en la parcela.
Aspecto de la planta	Se calificaron estéticamente las condiciones de la planta; se consideró la relación altura planta-mazorca, enfermedades, color de las hojas, y presencia de folíolos, según esta escala: (1) mala, (3) media y (5) buena.
Enfermedades	Se registró la tolerancia a las principales enfermedades en la planta. Se usó la siguiente escala: (1) baja, (3) media y (5) alta; y se reportaron las principales enfermedades observadas.
Pubescencia foliar	Se calificó sobre la hoja de la mazorca superior durante la floración. Se empleó la siguiente escala: (3) escasa, (5) intermedia y (7) densa.
Orientación de la hoja	Se registró después de la floración, según fueran (1) erectas o (2) colgantes.
Coloración de la panoja por antocianinas	Se observaron las glumas y se determinó si estaban (1) ausentes o (2) presentes. Si estaban presentes, se indicó su color.
Densidad del polen	Se indicó cualitativamente la densidad de liberación de polen así: (1) baja, (3) media y (5) abundante.
Coloración por antocianinas en los estigmas	Se observaron los estigmas y se indicó si estaban (1) ausentes o (2) presentes. Si estaban presentes, se registró su color.
Forma de la mazorca	Se catalogó de acuerdo con esta guía: (1) cilíndrica, (2) cilíndrica-cónica, (3) cónica, (4) esférica.
Disposición de las hileras	Se determinaron de acuerdo con esta clasificación: (1) regular, (2) irregular, (3) recta, (4) en espiral.
Número de hileras de granos	Se contaron las hileras de granos en la parte central de la mazorca.
Número de granos por hilera	Se contó el número de granos, por hilera, de la mazorca superior desde la base hasta el ápice.



Variable	Descripción
Peso de mazorcas a la cosecha (g)	A la cosecha, se registró el peso en fresco del total de mazorcas cosechadas.
Longitud de la mazorca (cm)	Se midió la distancia comprendida desde la base hasta el ápice de la mazorca superior.
Diámetro de la mazorca (cm)	Se midió en la parte central de la mazorca.
Color de la tusa	Se usó la siguiente codificación: (1) blanco, (2) rojo, (3) café, (4) morado, (5) jaspeado, (6) otro. Si otro, se indicó dicho color.
Tipo de grano	Se indicó, como máximo, tres tipos de granos según la frecuencia, así: (1) harinoso, (2) semiharinoso «una capa externa de endospermo duro», (3) dentado, (4) semidentado «entre dentado y cristalino, pero más parecido al dentado», (5) semicristalino «cristalino de capa suave», (6) cristalino, (7) reventador, (8) dulce, (9) opaco-2, (10) tunicado, (11) ceroso.
Color del grano	Se refirió a la apariencia externa. Se indicaron como máximo tres colores en orden de frecuencia, así: (1) blanco, (2) amarillo, (3) morado, (4) jaspeado, (5) café, (6) anaranjado, (7) moteado, (8) capa blanca, (9) rojo.
Peso de 100 granos (g)	Se pesaron 100 granos de maíz con su contenido de humedad (CH) al 12 %.
Desgrane (%)	Se midió a partir del peso de las mazorcas con y sin su raquis.
Rendimiento por hectárea (kg/ha)	Fue el cálculo del rendimiento potencial teniendo en cuenta el peso de la mazorca y el porcentaje de desgrane; se consideró una población de 62.500 plantas/hectárea

Cosecha

Las accesiones se cosecharon en mayo del 2024, 180 días después de siembra (dds), cuando presentaron madurez fisiológica y un contenido de humedad (CH) de grano del 18 %, aproximadamente. Solo se cosecharon las mazorcas recubiertas por la bolsa de papel, para garantizar que dichos materiales provenían de la polinización controlada descrita previamente. Cada accesión se cosechó, empacó y rotuló separadamente. Las mazorcas cosechadas que tuvieron CH alrededor del 18 % se trasladaron al laboratorio de semillas y se dispusieron en un cuarto de secado por un periodo de 24 a 30 horas a 28 °C y con HR entre el 28 % y 30 %, hasta llegar a un CH del 12 %. Una vez el CH fue el esperado, las mazorcas se retiraron del cuarto de secado y se evaluaron las variables morfoagronómicas de mazorcas y granos. Posteriormente, se seleccionaron las mazorcas sin daños o deformaciones para el desgrane.

Cada accesión cosechada se revisó manualmente por técnicos del BGAA para eliminar semilla sin calidad física y sanitaria (partida, fracturada, dañada o enferma). Luego, cada accesión se empacó y rotuló en bolsas trilaminadas de 1 kg, y se selló al vacío, condición favorable para la viabilidad de la semilla. Finalmente, la semilla se almacenó entre 0 °C y 5 °C en cuartos fríos a 40 % de HR hasta su entrega final en junio del 2024.

Rematriación

La rematriación implica la restitución, recuperación y devolución a su lugar de origen de elementos culturales, recursos naturales o conocimientos que han sido desplazados o perdidos a lo largo del tiempo [54]. En el contexto agrícola y biocultural de la semilla —en el cual AGROSAVIA ha forjado una valiosa y larga experiencia gracias a trabajos mancomunados con comunidades campesinas y étnicas— proponemos que “rematriar”



es la recuperación, incremento y retorno de semillas nativas a las comunidades agricultoras locales de las cuales provenían. De esta manera, concordamos con la propuesta de Búrquez et al. [55], la cual plantea que la Rematriación implica el reconocimiento del derecho de las comunidades sobre las variedades locales cultivadas, los paisajes y las tradiciones asociadas a estos recursos.

La conceptualización de la estrategia que denominamos Rematriación en el contexto de las comunidades campesinas y étnicas, fue abordada específicamente con el pueblo indígena Kamëntsá-biyá, y siguió un enfoque metodológico participativo e interdisciplinario [56].

La primera parte del trabajo incluyó una revisión bibliográfica exhaustiva de estudios de caso y de informes técnicos relacionados con procesos de Rematriación, de agrobiodiversidad y del impacto de la pérdida de las semillas nativas y criollas en comunidades campesinas y étnicas. Con la participación continua de miembros de las comunidades locales, se exploraron percepciones, conocimientos y experiencias en torno a la agricultura, la conservación de semillas y la Rematriación. Los datos cualitativos recopilados fueron analizados mediante un enfoque inductivo. Finalmente, los resultados preliminares fueron presentados a la comunidad participante para su validación y enriquecimiento, con lo que se aseguró la representatividad y relevancia de la conceptualización de la Rematriación localmente.

La estrategia de Rematriación de AGROSAVIA se desarrolló con base en los siguientes pilares:

- **Comprensión y respeto cultural:** se fundamentó en el reconocimiento de las tradiciones, conocimientos y prácticas agrícolas de las comunidades como activos fundamentales para el desarrollo agrícola sostenible. Además, facilitó el entendimiento del contexto histórico, social, cultural y agrícola, y validó la experiencia y los conocimientos ancestrales para asegurar que la iniciativa fuese culturalmente apropiada y pertinente.
- **Participación comunitaria constante:** esta garantizó que las comunidades locales se vincularan y beneficiaran durante todo el proceso de Rematriación. De esta manera se logró la aceptación local, se aseguró la relevancia y se favoreció la sostenibilidad de la estrategia en las comunidades beneficiarias.
- **Restitución:** permitió el retorno o entrega de semillas nativas o criollas de importancia cultural y espiritual para la comunidad. Como valor agregado, estas semillas cumplen con todos los atributos de calidad (física, genética, fisiológica y sanitaria) [19, 20]. Las semillas para la restitución pueden provenir de procesos comunitarios de almacenamiento o recolección, o pueden estar conservadas en los BGAA.
- **Fortalecimiento de los sistemas locales:** se fomentó la integración de conocimientos científicos adaptados a las necesidades locales, y fueron complementados con prácticas de saberes tradicionales. Así se robustecieron los sistemas de producción y conservación de semillas de las comunidades.



RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Red de Guardianes de Semilla del Pueblo Kamëntsá-biyá

Se constituyó y fortaleció la Red de Guardianes de Semilla del Resguardo Kamëntsá-biyá. Con ella, se concertaron las pautas para rematriar las semillas de maíz provenientes del BGAA a su territorio. El proceso partió del reconocimiento de las prácticas culturales asociadas a la producción de alimentos, de sus imaginarios y las representaciones asociadas al *jajañ* que los Kamëntsá-biyá mantienen y reproducen continuamente. El *jajañ* condensa la riqueza y variedad de especies alimentarias, medicinales, maderables y espirituales que determinan la identidad colectiva y que son expresión del conocimiento ancestral forjado en el tiempo. En este complejo —pero armonioso— sistema de interrelaciones, el maíz es parte de la diversidad de plantas cultivadas con varios usos: es alimento, se utiliza como guía o tutor para plantas enredaderas y enriquece el suelo en forma de abono.

Las semillas conservadas en el BGAA y multiplicadas por AGROSAVIA para la Rematriación requerían ser incrementadas por la red de guardianes para su posterior distribución, intercambio y uso por parte de toda la comunidad. Se acordó que la red incrementase la semilla rematriada en el sistema de *jajañ*, trabajo hecho por diez guardianes seleccionados por la comunidad, con un manejo de los lotes combinado entre prácticas tradicionales del *jajañ* y recomendaciones técnicas para la multiplicación, desarrollo del cultivo y obtención de semilla de calidad dadas por AGROSAVIA.

La selección de los diez guardianes incluyó etapas de diálogo y concertación para que se apropiara el propósito de la Rematriación de manera sinérgica con los principios del *jajañ*. Al pueblo Kamëntsá-biyá, AGROSAVIA le retornó 2 kg de semilla por accesión. En cada *jajañ* se establecieron parcelas para la siembra de 1 kg de semillas, mientras que el otro kilogramo se conservó para futuras resiembras o para establecer nuevas parcelas.

Adicionalmente, se consideraron aspectos como la disponibilidad de un área apropiada para la producción de maíz, las condiciones de fertilidad del suelo, la poca probabilidad de sufrir inundaciones y que el lote estuviese aislado o separado de otras siembras de maíz para evitar cruzamientos indeseados de las accesiones. Para la selección de los lotes, empleamos la guía “Historia de uso y revisión del lote para la producción de semilla” [21], adaptándola al cultivo de maíz. Un factor fundamental para ser nombrado guardián fue el conocimiento del cultivo por parte de los candidatos, además del interés de convertirse en multiplicadores de dicha semilla y de sus conocimientos interculturales (es decir, la complementación técnica, científica y ancestral) asociados a la siembra de maíz.

Caracterización de materiales y obtención de semilla

Al final del ciclo del cultivo (180 dds), se cosecharon las mazorcas provenientes de la polinización controlada y se procedió con la postcosecha y beneficio en el laboratorio. El CH de los materiales se estandarizó en 12 %, condición que favorece tanto la calidad fisiológica como la sanitaria en el almacenamiento. En promedio se obtuvieron 3 kg de semilla de calidad de cada accesión. Esta se empacó en bolsas trilaminadas selladas al vacío y se rotuló con la información de cada accesión. Simultáneamente, se reintegraron al BGAA 300 g de semilla por accesión. La semilla incrementada fue fotografiada (Figuras 2 y 3), digitalizada y se



registraron 28 variables morfoagronómicas (cuantitativas y cualitativas) de plantas, mazorcas y granos. Esta información permitió ampliar y actualizar la información del pasaporte de cada accesión en la base de datos del BGAA. Las variables registradas de cada accesión se detallan en las Tablas 3 y 4. Todas las accesiones presentaron características de maíces de trópico alto, con rusticidad y variabilidad normales para genotipos nativos o criollos, principalmente en altura, presencia de antocianinas en sus estructuras, y variación en el color y tipo de grano. Gómez y otros [57] establecieron que la variabilidad de los maíces criollos se genera por el efecto genético, el ambiental y por la interacción de estos dos. Dicha variabilidad se manifiesta en campo en la altura de la planta, el tamaño de la mazorca, el color del grano, la resistencia a enfermedades y la cobertura de la mazorca.

TABLA 3. Variables cuantitativas de las accesiones de maíz incrementadas.

Variables	Accesión									
	Putumayo 307	Putumayo 317	Putumayo 343	Putumayo 344	Putumayo 345	Putumayo 346	Putumayo 359	Putumayo 362	Putumayo 364	Putumayo 374
Altura de la mazorca (cm)	201	207	220	163	205	192	193	148	204	163
Altura de la planta (cm)	329	317	354	275	332	302	307	249	319	271
Floración femenina (días)	91	99	92	91	86	92	95	86	90	92
Floración masculina (días)	92	100	93	92	87	94	96	88	91	94
Acame de raíz (%)	7,3	0	0	2,4	4,0	0,8	2,3	1,9	0,8	0
Acame de tallo (%)	0	0,4	1,4	0	0,5	0,8	0	0,0	0,4	2,0
Longitud de la mazorca (cm)	13,3	11,2	15,9	12,7	14,2	14,4	11,6	11,7	13,2	15,0
Diámetro de la mazorca (cm)	4,9	4,2	4,7	4,9	4,8	5,1	4,9	4,4	4,1	4,4
Desgrane (%)	0,81	0,85	0,84	0,82	0,88	0,84	0,84	0,82	0,85	0,82
Número de granos por hilera	23	22	26	20	24	23	19	21	26	24
Número de hileras de granos	16	14	16	14	12	14	14	12	14	14
Peso de mazorcas a la cosecha (g)	148,9	87,9	170,1	134,5	175,1	183,3	135,8	125,9	121,9	134,7
Peso de 100 granos (g)	35,5	23,0	32,1	43,2	50,9	48,3	42,2	41,6	25,9	38,11
Rendimiento por hectárea (kg/ha)	7.538	4.669	8.930	6.893	9.630	9.623	7.129	6.452	6.475	6.903



TABLA 4. Variables cualitativas de las accesiones de maíz incrementadas

Variables	Accesión									
	Putumayo 307	Putumayo 317	Putumayo 343	Putumayo 344	Putumayo 345	Putumayo 346	Putumayo 359	Putumayo 362	Putumayo 364	Putumayo 374
Coloración por antocianinas en raíces adventicias	media	ausente	media	media	fuerte	ausente	media	media	ausente	media
Color del tallo	morado	café	café	morado	verde	morado	verde	morado	verde	verde
Aspecto de la planta	buena	media	media	media	buena	media	media	buena	media	buena
Enfermedades	alta	media	alta	alta	baja	alta	media	media	media	alta
Pubescencia foliar	escasa	escasa	escasa	escasa	intermedia	intermedia	intermedia	intermedia	escasa	escasa
Orientación de la hoja	erecta	erecta	erecta	erecta	erecta	erecta	erecta	erecta	erecta	erecta
Coloración de la panoja por antocianinas	presente	presente	presente	presente	presente	presente	presente	presente	presente	presente
Densidad del polen	media	media	media	media	media	media	media	media	media	media
Coloración por antocianinas en los estigmas	ausente	presente	presente	presente	presente	presente	presente	presente	presente	presente
Forma de la mazorca	cilíndrica - cónica	cilíndrica - cónica	cilíndrica - cónica	cilíndrica - cónica	cilíndrica	cilíndrica - cónica	cilíndrica - cónica	cilíndrica	cilíndrica - cónica	cilíndrica - cónica
Disposición de las hileras	recta	regular	recta	en espiral, recta	recta	recta, en espiral	en espiral	recta, en espiral	recta, en espiral	en espiral, recta
Color de la tusa	jaspeado	blanco	blanco	blanco	blanco	rojo	blanco	blanco	blanco	blanco
Tipo de grano	crystalino	semi cristalino	semi cristalino	crystalino	crystalino	crystalino	crystalino	crystalino	crystalino	semi cristalino
Color del grano	amarillo	amarillo	blanco	blanco	amarillo	blanco	blanco	anaranjado	amarillo	blanco

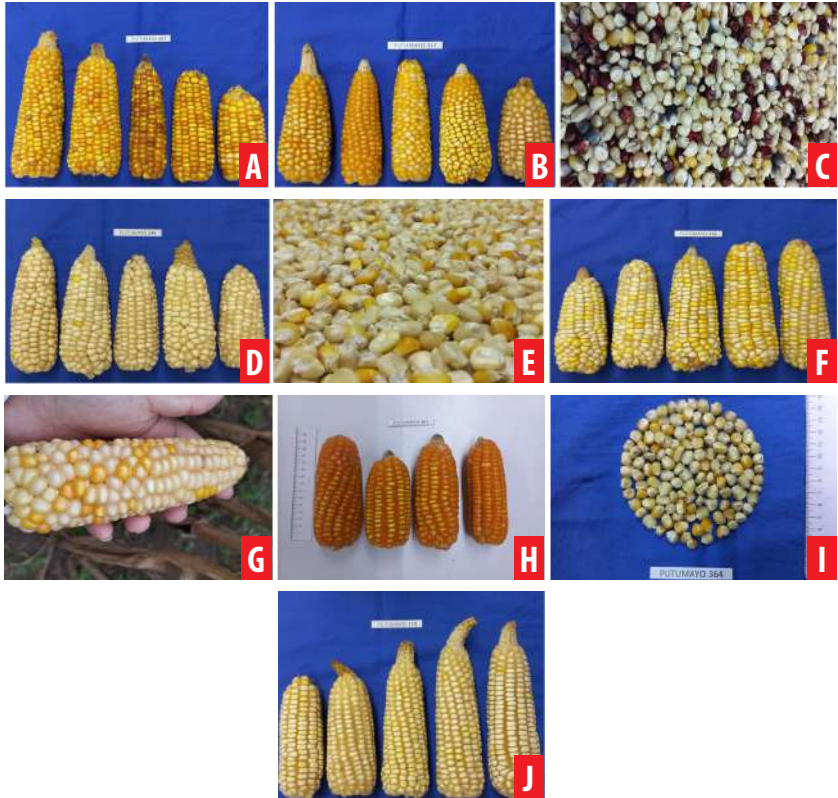


FIGURA 2. Maíces rematriados al pueblo Kamëntsá-biyá. **A** Putumayo 307, **B** Putumayo 317, **C** Putumayo 343, **D** Putumayo 344, **E** Putumayo 345, **F** Putumayo 346, **G** Putumayo 359, **H** Putumayo 362, **I** Putumayo 364, y **J** Putumayo 374.

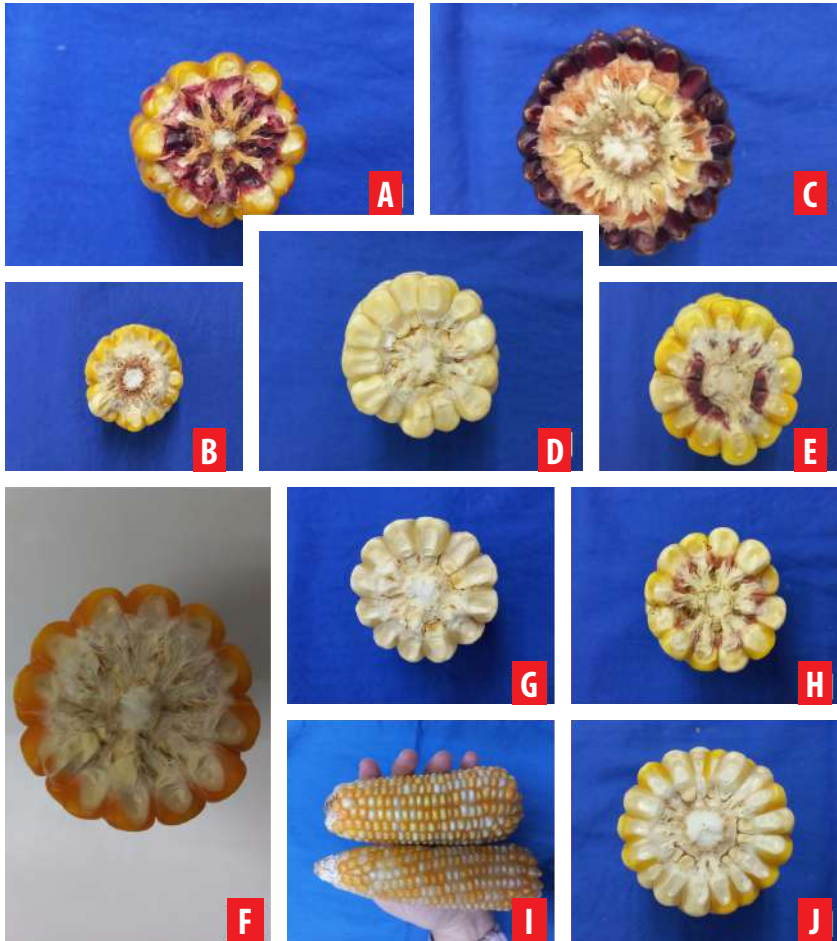


FIGURA 3. Cortes transversales de las mazorcas de las diez accesiones de maíz rematriadas al pueblo Kaméntsá-biyá. **A** Putumayo 307, **B** Putumayo 343, **C** Putumayo 317, **D** Putumayo 344, **E** Putumayo 345, **F** Putumayo 362, **G** Putumayo 374, **H** Putumayo 364, **I** Putumayo 346, y **J** Putumayo 359.

El promedio de días para floración femenina y masculina fue de 91 y 92, respectivamente, presentaron una sincronía floral apropiada para garantizar la correcta fecundación de la accesión, y con una respuesta normal frente a un ciclo de producción de maíces de trópico alto. La altura de la mazorca, en promedio, fue mayor a 180 cm en todas las accesiones y la altura de la planta osciló alrededor de los 300 cm, con una relación entre ellas de 0,63. Esto sugiere que las mazorcas de estas accesiones no tienen una distribución balanceada con respecto a la estructura total de la planta, lo que podría favorecer volcamientos en ciertas condiciones climáticas.

El índice promedio de desgrane fue de 0,83; valor aceptable y no distante del índice para un maíz comercial (0,80); lo que indica que estas accesiones tienen buen potencial productivo bajo buenas condiciones agronómicas y climáticas, y que representan una



buena oportunidad económica para las comunidades que usarán estos materiales. Las accesiones Putumayo 359 y Putumayo 344 presentaron el menor número de hileras, mazorcas más delgadas y con menor número de granos por mazorca. Esta condición está altamente correlacionada con el rendimiento potencial por hectárea, y efectivamente, estas accesiones tuvieron los menores desempeños productivos. Los rendimientos de las accesiones superaron los 7000 kg/ha.

En las 10 accesiones la orientación de las hojas fue erecta, lo que favorece una buena interceptación de luz y permite usar un mayor número de plantas por hectárea. Igualmente, la mayoría fue tolerante a enfermedades y presentaron antocianinas en estigmas y panojas. Las mazorcas tuvieron formas cónicas y disposiciones rectas de las hileras. El color del grano primario varió entre amarillo y blanco. La mayoría de los materiales presentó coloraciones secundarias y en algunos casos terciarias, con las excepciones de Putumayo 362 (con coloraciones anaranjadas) y Putumayo 344 (de color blanco).

La variabilidad genética de los maíces criollos depende altamente de la conservación tradicional desarrollada por los agricultores *in situ* [58]. Sin embargo, para mejorar dichos procesos de conservación es fundamental identificar y conocer la agrobiodiversidad de estos maíces para estructurar procesos óptimos y sólidos de almacenamiento y de conservación.

La Rematriación —que desarrolló AGROSAVIA— incluyó la elaboración de una cartilla para el reconocimiento y el manejo de las accesiones de maíz, en la que se detallaron los aspectos morfológicos de cada material para su adecuada identificación. Además de ser bilingüe (Español-Kamëntsá), la cartilla tiene un formato sencillo y de fácil apropiación por la comunidad. Asimismo, se incluyeron algunas recomendaciones para incrementar y conservar las semillas con calidad en un sistema tradicional de producción. Así, los guardianes tienen un documento con la información básica para continuar con los procesos de multiplicación de semilla *in situ*.

Este material fortalece las estrategias de mitigación frente a la pérdida de la agrobiodiversidad por efectos humanos o de la variabilidad climática. Con este trabajo, AGROSAVIA fomenta y consolida procesos de recuperación y conservación de materiales tradicionales y locales, así como la preservación de la riqueza cultural y de los conocimientos ancestrales, con las comunidades en sus territorios.

Los sistemas locales de producción de semilla y la semilla de calidad

Las redes de agricultores transfieren todo tipo de material vegetal reproductivo (v. g., semillas, esquejes, tubérculos, estacas, etc.) de especies domesticadas o no, por medio de distintos intercambios entre agricultores como regalos, donaciones, compras y trueques, fuera de los sectores comerciales regulados [18]. Las redes de semillas de los agricultores tienen un impacto importante y una contribución a la agricultura, muchas veces no reconocida y que no ha sido estudiada lo suficiente [18]. Estos intercambios brindan beneficios, pero también conllevan ciertos riesgos.

El movimiento y transporte de semillas y granos facilita e incrementa la movilidad y dispersión de micotoxinas, especies invasoras, plagas, patógenos y enfermedades a



niveles local, nacional, regional y global, tanto en el maíz como en otras especies [59, 60, 61, 62, 63]. Los movimientos de semilla distribuyen problemas que viajan en o con la semilla misma [9, 64, 65, 66, 67, 68]. Los brotes de enfermedades de plantas siguen en aumento y son una amenaza constante a la seguridad alimentaria mundial, especialmente en zonas vulnerables [69]. Por todo lo anterior, es muy importante tener claro los riesgos que la movilización de semilla y de grano sin calidad tiene para los sistemas de semilla y los sistemas de producción agrícola.

El uso y reúso de semillas con plagas y enfermedades incrementa y multiplica dichos problemas sanitarios con el tiempo, lo que dificulta mucho más su manejo y en ocasiones lleva a la pérdida del cultivo o de sus productos [70, 71].

Buena parte del éxito de un sistema de producción local inicia con sus semillas, las cuales deben estar libres de plagas, patógenos y enfermedades; deben ser semillas que tengan condiciones óptimas de germinación y vigor, semillas sin fracturas y enteras; y que estén libres de semillas de malezas o de otras especies; es decir, debe ser semilla con calidad [6, 20]. De esta manera se disminuye la probabilidad de introducción de problemas sanitarios a zonas libres de estos y se limitan o previenen procesos de invasión y saturación de plagas y patógenos [9]. Una meta de los sistemas locales de semilla es que los agricultores tengan acceso a semillas de calidad, seguras y adaptables de los materiales deseados [72]. Es fundamental movilizar y usar semilla de calidad durante los intercambios de semilla a nivel local, en las entregas de los programas de fomento, y en los procesos de Rematriación para evitar la introducción, dispersión, invasión y saturación de plagas y patógenos. Por ello es importante fortalecer las redes de semillas en aspectos como la calidad de la semilla, en particular la sanitaria.

Acercamiento a la comunidad, construcción de confianza y ejercicios técnicos

La constitución de la red de guardianes del resguardo Kamëntsá-biyá, así como los procesos de rescate, incremento y conservación de semilla, fueron los resultados de la intervención mediada por la generación de confianza, la apertura a nuevas visiones y a distintos esquemas de pensamiento.

El acercamiento a la comunidad y los acuerdos logrados se desarrollaron en el marco de “diálogos de saberes interculturales”, en los que se identificaron necesidades como el rescate y la conservación de semillas nativas de maíz. Este proceso —forjado con diálogos horizontales y constructivos— construyó una relación de confianza y reciprocidad entre los Kamëntsá-biyá y AGROSAVIA, la que permitió la producción colectiva de conocimientos a partir del saber tradicional Kamëntsá-biyá y del conocimiento científico y técnico liderado por AGROSAVIA. Se consensuaron principios como el trabajo en red, los bancos locales de semilla, los criterios para la conservación y mantenimiento de la calidad de la semilla y la trazabilidad, entre otros. Todo en conjunto robustece la Rematriación de los maíces en el Valle de Sibunday, Putumayo, con el pueblo Kamëntsá-biyá.

La Rematriación

La rematriación es la restauración de las semillas para retornarlas a sus comunidades nativas, e implica un acto de respeto, que reconoce su valor intrínseco [45]. Esta busca



preservar la diversidad genética vegetal y mantener vivas las prácticas agrícolas tradicionales y el conocimiento ecológico que las comunidades han desarrollado a lo largo de generaciones alrededor de dichas plantas. Por esto, la Rematriación difiere significativamente del enfoque tradicional de conservación de semillas, que a menudo se centra en la acumulación y control de recursos genéticos *in situ* o *ex situ*.

En Norteamérica, la red de guardianes de semillas “Seed Keepers Network” fomenta la rematriación de semillas nativas desde instituciones que las han recolectado o recibido para devolverlas a las comunidades de donde provienen [73]. En Colombia, después de la firma del Convenio sobre la Diversidad Biológica (1992), el gobierno nacional promovió la creación de los BGAA en 1994, con base en las colecciones de trabajo del ICA [26]. Desde entonces, la conservación de estos recursos biológicos ha sido asignada a AGROSAVIA, con el principal objetivo de preservar la diversidad genética, garantizar su viabilidad, distribución y uso para las comunidades. Por ello, los BGAA son la principal fuente para el programa de Rematriación.

El proceso de Rematriación cuenta con el acompañamiento continuo de AGROSAVIA hacia la comunidad, en este caso los Kamëntsá-biyá, el cual reconoce y valora las prácticas, usos y costumbres tradicionales que determinan su identidad cultural. La validación y fomento de las prácticas productivas asociadas al *jajañ* representan un punto de encuentro entre los principios que rigen el devenir de los Kamëntsá-biyá en el territorio y los que AGROSAVIA propone para propiciar escenarios agrícolas sostenibles, con la recuperación de la agrobiodiversidad y la implementación del uso de semilla de calidad —libre de problemas como plagas, patógenos, especies invasoras y enfermedades—, así como la conservación de los conocimientos tradicionales. Esta sinergia, en conjunto con el reconocimiento mutuo y el establecimiento de relaciones de confianza, va más allá de las iniciativas previas desplegadas en la zona, ya que ha logrado la apropiación y el empoderamiento de la comunidad por medio de la Rematriación.

Así, la Rematriación de semillas nativas se posiciona como una iniciativa estratégica para el desarrollo nacional, la cual contribuye al fortalecimiento de los sistemas locales de producción de las comunidades, mejora la seguridad alimentaria y aún por la preservación de la agrobiodiversidad como un recurso fundamental para el futuro de Colombia. El proceso de Rematriación, liderado por AGROSAVIA, se suma a una red de esfuerzos implementados en el país que reconoce las necesidades de los agricultores y que refleja el compromiso de AGROSAVIA con la restitución de prácticas agrícolas, la preservación de la memoria cultural, la autonomía en los territorios y la conservación de la agrobiodiversidad.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al pueblo indígena Kamëntsá-biyá, en especial a los líderes del componente de semillas que participaron en la Rematriación y a su Red de Guardianes de Semillas. Igualmente, al Departamento de Agrobiodiversidad de AGROSAVIA por el mantenimiento permanente de las accesiones de maíces nativos y criollos, y por permitir el acceso a estos materiales para su incremento y retorno al pueblo indígena. Los autores agradecemos el apoyo y la colaboración de Yeimy A. Izquierdo Cujar;



al igual que a la Red Latinoamericana del Maíz (proyecto Tech-Maíz) del Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED), por fomentar la difusión del conocimiento y de nuevas tecnologías en la región.

Igualmente, le agradecemos al Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia por la financiación dada a este trabajo, en el marco del proyecto “Fortalecimiento al Sistema Nacional de Innovación Agropecuaria (SNIA) en su objetivo 2: Consolidar los lineamientos para el diseño, conformación y seguimiento de los Sistemas Territoriales de Innovación con enfoque diferencial con la comunidad Kamëntsá-Biyá (Sibundoy, Putumayo)”. Este proyecto fue ejecutado por AGROSAVIA y el Cabildo Kamëntsá-Biyá”.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Julio Ramírez Durán contribuyó con la idea, desarrolló diálogos interculturales, participó en la conceptualización y ejecución del proceso y escribió el artículo.

John F. Hernández Nopsa contribuyó con la idea, desarrolló diálogos interculturales, participó en la conceptualización y ejecución del proceso y escribió el artículo.

Luis F. Rincón Manrique desarrolló diálogos interculturales, participó en la ejecución del proceso y escribió el artículo.

Karen V. Osorio Guerrero participó en el incremento de semillas de calidad, en la conceptualización de ideas y escribió el artículo.

Manuel A. Guzmán Hernández participó en el incremento de semillas de calidad, y escribió el artículo.

Julienne A. Barreto Rojas participó en la conceptualización de ideas y escribió el artículo.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no existe conflicto de interés.

REFERENCIAS

- [1] Rangel-Ch & Orlando, J. O (2015). La biodiversidad de Colombia: significado y distribución regional. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 39, 176-200. <http://dx.doi.org/10.18257/raccefyfyn.136>
- [2] Huddart, J. E. A., Crawford, A. J., Luna-Tapia, A. L., Restrepo, S., & Di Palma, F. (2022). EBP-Colombia and the bioeconomy: Genomics in the service of biodiversity conservation and sustainable development. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119(4). <https://doi.org/10.1073/pnas.2115641119>
- [3] Mamo, Dwayne. (2024). El Mundo Indígena. Grupo Internacional de Trabajo sobre Asuntos Indígenas. *IWGIA*. <https://shorturl.at/6o0hG>
- [4] Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2019). Población indígena de Colombia: resultados del censo nacional de población y vivienda 2018. *DANE*. <https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/grupos-etnicos/presentacion-grupos-etnicos-2019.pdf>
- [5] Pautasso, M., Aistara, G., Barnaud, A., Caillon, S., Clouvel, P., Coomes, O. T., Deletre, M., Demeulenaere, E., De Santis, P., Doring, T., Eloy, L., Empeaire, L., Garine, E., Goldringer, I., Jarvis, D., Joly, H. I., Leclerc, C., Louafi, S., Martin, P., Massol, F., McGuire, S., McKey, D., Padoch, C., Soler, C., Thomas, M., & Tramontini, S. (2013). Seed exchange networks for agrobiodiversity conservation. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 33, 151-175. <https://doi.org/10.1007/s13593-012-0089-6>
- [6] Hernández Nopsa, J. F., Patiño Moscoso, M. A., Moreno Pérez, S., Valencia Sánchez, J. S., Pérez Cantero, S. P., & Ramírez Durán, J. (2023). Bancos Locales de Semilla en La Guajira: guía para su implementación. *Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA)*, Mosquera, Cundinamarca, Colombia. <https://editorial.agrosavia.co/index.php/publicaciones/catalog/view/370/403/2283-1>
- [7] Secretaría de la Convención Internacional de Protección Fitosanitaria. (2021). Resumen para los responsables de políticas de la revisión científica del impacto del cambio climático en las plagas de las plantas. Un desafío mundial en la prevención y la mitigación de los riesgos de plagas en la agricultura, la silvicultura y los ecosistemas. Roma. *FAO en nombre de la Secretaría de la Convención Internacional de Protección Fitosanitaria (CIPF)*. <https://doi.org/10.4060/cb4777es>
- [8] Secretaría de la Convención Internacional de Protección Fitosanitaria. (2021). Revisión científica del impacto del cambio climático en las plagas de las plantas. Un desafío mundial en la prevención y la mitigación de los riesgos de plagas en la agricultura, la silvicultura y los ecosistemas. Roma. *FAO en nombre de la Secretaría de la Convención Internacional de Protección Fitosanitaria (CIPF)*. <https://doi.org/10.4060/cb4769es>
- [9] Xing, Y., Hernandez Nopsa, J. F., Andersen, K. F., Andrade-Piedra, J. L., Beed, F. D., Blomme, G., Carvajal-Yepes, M., Coyne, D. L., Cuellar, W. J., Forbes, G. A., Kreuze, J. F., Kroschel, J., Kumar, P. L., Legg, J. P., Parker, M., Schulte-Geldermann, E., Sharma, K., & Garrett, K. A. (2020). Global cropland connectivity: A risk factor for invasion and saturation by emerging pathogens and pests. *BioScience*, 70(9), 744-758. <https://doi.org/10.1093/biosci/biaa067>
- [10] Carvajal-Yepes, M., Cardwell, K., Nelson, A., Garrett, K. A., Giovani, B., Saunders, D. G. O., Kamoun, S., Legg, J. P., Verdier, V., Lessel, J., Neher, R. A., Day, R., Pardey, P., Gullino, M. L., Records, A. R., Bextine, B., Leach, J. E., Staiger, S., & Tohme, J. (2019). A global surveillance system for crop diseases. *Science*, 364(6447), 1237-1239. <https://www.science.org/doi/full/10.1126/science.aaw1572>
- [11] Andrade-C, M. G. (2011). Estado del conocimiento de la biodiversidad en Colombia y sus amenazas: Consideraciones para fortalecer la interacción ciencia-política. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 35, 491-507. [https://doi.org/10.18257/raccefyfyn.35\(137\).2011.2424](https://doi.org/10.18257/raccefyfyn.35(137).2011.2424)
- [12] Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. (2019). Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. Paris. *Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES)*. https://files.ipbes.net/ipbes-web-prod-public-files/inline/files/ipbes_global_assessment_report_summary_for_policymakers.pdf
- [13] Penagos, Á. M., Parra, M. A., & Granados, S. (2022). La biodiversidad y el desarrollo agropecuario en Colombia: propuesta para avanzar hacia una transformación desde la perspectiva del desarrollo sostenible. *Naturaleza y Sociedad. Desafíos Medioambientales*, (2), 51-67. <https://doi.org/10.53010/nys2.03>



- [14] Nagarajan, L., Smale, M., & Glewwe, P. (2007). Determinants of millet diversity at the household-farm and village-community levels in the drylands of India: The role of local seed systems. *Agricultural Economics*, 36(2), 157-167. <https://doi.org/10.1111/j.1574-0862.2007.00195.x>
- [15] Buddenhagen, C. E., Hernández Nopsa, J. F., Andersen, K. F., Andrade-Piedra, J., Forbes, G. A., Kromann, P., Thomas-Sharma, S., Useche, P., & Garrett, K. A. (2017). Epidemic network analysis for mitigation of invasive pathogens in seed systems: Potato in Ecuador. *Phytopathology*, 107(10), 1209-1218. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-03-17-0108-FI>
- [16] Suárez, L., Hernández, M. M., & Ríos, H. (2005). Caracterización de los sistemas locales de manejo de la semilla de yuca (*Manihot esculenta* Crantz) en dos localidades del municipio La Palma, Pinar del Río. *Cultivos Tropicales*, 26(2), 59-63. <https://www.redalyc.org/pdf/1932/193215934012.pdf>
- [17] Almekinders, C. J., Louwaars, N. P., & de Bruijn, G. H. (1994). Local seed systems and their importance for an improved seed supply in developing countries. *Euphytica*, 78, 207-216. <https://doi.org/10.1007/BF00027519>
- [18] Coomes, O. T., McGuire, S. J., Garine, E., Cailion, S., McKey, D., Demeulenaere, E., Jarvis, D., Aistara, G., Barnaud, A., Clouvel, P., Empeiraire, L., Louafi, S., Martin, P., Massol, F., Pautasso, M., Violon, C., & Wencélius, J. (2015). Farmer seed networks make a limited contribution to agriculture? Four common misconceptions. *Food Policy*, 56, 41-50. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2015.07.008>
- [19] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2010). Seeds in Emergencies: A Technical Handbook (Vol. 202). *Food & Agriculture Organization of the UN (FAO)*. <http://www.fao.org/3/a-i1816e.pdf>
- [20] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) y AfricaSeeds. (2019). Materiales para capacitación en semillas - Módulo 3: Control de calidad y certificación de semillas. *FAO*. <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/ca1492es>
- [21] Wagner-Medina, E. V., Valencia-Montoya, J. A., Caicedo-Arana, Á., & Hernandez Nopsa, J. F. (2023). Manual técnico para producir semilla asexual de calidad de plátano cv. Dominico Hartón por macropropagación. *Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, AGROSAVIA*. <https://doi.org/10.21930/agrosavia.manual.7406139>
- [22] Bishaw, Z., Makkawi, M., & Niane, A. A. (2009). Seed quality and alternative seed delivery systems. In *The lentil: botany, production and uses* (pp. 350-367). *Wallingford UK: CABI*. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/abs/10.1079/9781845934873.0350>
- [23] Martínez, M. A., Gomes Junior, F. G., Arango, M. R., & Gallo, C. D. V. (2020). El análisis de calidad de semillas en un nuevo escenario tecnológico. *Para mejorar la producción*. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/169910>
- [24] González Almarío, C., Jiménez Sabogal, H. R., Rugeles Barandica, L. A., & Bejarano Garavito, D. H. (2020). Banco de germoplasma animal para la alimentación y la agricultura. *AGROSAVIA*. <https://doi.org/10.21930/agrosavia.brochure.7404081>
- [25] Westengen, O. T., Skarbø, K., Mulesa, T. H., & Berg, T. (2018). Access to genes: Linkages between genebanks and farmers' seed systems. *Food Security*, 10, 9-25. <https://doi.org/10.1007/s12571-017-0751-6>
- [26] González Almarío, C., Jiménez Sabogal, H. R., Rugeles Barandica, L. A., Cañar Serna, D. Y., & Tibaduiza Castañeda, L. P. (2021). Contexto de los Bancos de Germoplasma para la Alimentación de la Nación Colombiana. En *Conservación y manejo de la diversidad microbiana en los Bancos de Germoplasma para la Alimentación y la Agricultura en Colombia*. *Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA)*, cap. 1, 28-38. <https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/36935>
- [27] Valencia, R. A., Lobo Arias, M., & Ligarreto, G. A. (2010). Estado del arte de los recursos genéticos vegetales en Colombia: Sistema de Bancos de Germoplasma. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 11(1), 85-94. <https://www.redalyc.org/pdf/4499/449945028010.pdf>
- [28] González Almarío, C., Jiménez Sabogal, H. R., Rugeles Barandica, L. A., Uribe Gutiérrez, L. A., García Riaño, J. L., Amaya Gómez, C. V., Criollo Campos, P. J., Estrada Bonilla, G. A., Pérez Moncada, U. A., Bonilla Buitrago, R. R., Rengifo Ibañez, M. C., Jiménez Velásquez, S. C., Torres Higuera, L. D., López Ardila, D. E., Beltrán, O. G., Ovalle Masmela, J. C., Herrera León, R. F., & Rodríguez Villamizar, F. (2020). Historia de los Bancos de Germoplasma de Microorganismos AGROSAVIA (BGM-A). *Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria*. <https://editorial.agrosavia.co/index.php/publicaciones/catalog/book/125>

- [29] Cerón-Souza, I., Delgadillo-Duran, D., Polo-Murcia, S. M., Sarmiento-Naizaque, Z. X., & Reyes-Herrera, P. H. (2023). Prioritizing Colombian plant genetic resources for investment in research using indicators about the geographic origin, vulnerability status, economic benefits, and food security importance. *Biodiversity and Conservation*, 32(7), 2221-2261. <https://doi.org/10.1007/s10531-023-02599-7>
- [30] Pace, B. A., Perales, H. R., Gonzalez-Maldonado, N., & Mercer, K. L. (2024). Physiological traits contribute to growth and adaptation of Mexican maize landraces. *Plos one*, 19(2), e0290815. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0290815>
- [31] Kistler, L., Maezumi, S. Y., Gregorio de Souza, J., Przelomska, N. A. S., Malaquias Costa, F., Smith, O., Loiselle, H., Ramos-Madrigal, J., Wales, N., Ribeiro, E. R., Morrison, R. R., Grimaldo, C., Prous, A. P., Arriaza, B., Gilbert, M. T. P., de Oliveira Freitas, F., & Allaby, R. G. (2018). Multiproxy evidence highlights a complex evolutionary legacy of maize in South America. *Science*, 362(6420), 1309-1313. <https://doi.org/10.1126/science.aav0207>
- [32] Kistler, L., Thakar, H. B., VanDerwarker, A. M., Domic, A., Bergström, A., George, R. J., Harper, T. K., Allaby, R. G., Hirth, K., & Kennett, D. J. (2020). Archaeological Central American maize genomes suggest ancient gene flow from South America. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(52), 33124-33129. <https://www.pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.2015560117>
- [33] Roberts, L. M., Grant, U. J., Ramírez, R. E., Hatheway, W. H., Smith, D. L. & Mangelsdorf, P. C. (1957). Razas de maíz en Colombia. D.I.A., Ministerio de Agricultura de Colombia, Oficina de Investigaciones Especiales. *Boletín Técnico No 2. Bogotá, Colombia*. <https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/34542>
- [34] Pardey-Rodríguez, C., García-Dávila, M. A., y Moreno-Cortés, N. (2016). Caracterización de maíz procedente del departamento del Magdalena, Colombia. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 17(2), 167-190. <https://revistacta.agrosavia.co/index.php/revista/article/view/487/387>
- [35] Cardona, J. O. (2010). Análisis de diversidad genética de las razas colombianas de maíz a partir de datos Roberts et al., (1957) usando la estrategia Ward-MLM. *CienciAgro Journal de Ciencia y Tecnología Agraria*, 2(1), 199-207. <http://www.revistasbolivianas.ciencia.bo/pdf/rca/v2n1/v2n1a03.pdf>
- [36] Medina Rey, J. M., Ortega Carpio, M. L., y Martínez Cousinou, G. (2021). ¿Seguridad alimentaria, soberanía alimentaria o derecho a la alimentación? Estado de la cuestión. *Cuadernos de Desarrollo Rural*, 18. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.cdr18.sasa>
- [37] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (1996). Declaración de Roma sobre la Seguridad Alimentaria Mundial. *FAO*. <https://www.fao.org/4/w3613s/w3613s00.htm>
- [38] Ziegler, J. (2001). Derechos económicos, sociales y culturales: El derecho a la alimentación. *Naciones Unidas, Consejo Económico y Social. Comisión de Derechos Humanos*. <https://documents.un.org/doc/undoc/gen/g01/110/38/pdf/g0111038.pdf>
- [39] Zimmerer, K. S. (2003). Geographies of seed networks for food plants (potato, ulluco) and approaches to agrobiodiversity conservation in the Andean countries. *Society & Natural Resources*, 16(7), 583-601. <https://doi.org/10.1080/08941920309185>
- [40] Ricciardi, V. (2015). Social seed networks: Identifying central farmers for equitable seed access. *Agricultural Systems*, 139, 110-121. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2015.07.002>
- [41] Lugo-Castilla, S., Negrete-Yankelevich, S., Benítez, M., & Porter-Bolland, L. (2023). Seed exchange networks as important processes for maize diversity conservation and seed access in a highland region of Mexico. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 47(10), 1461-1487. <https://doi.org/10.1080/21683565.2023.2246417>
- [42] Labeyrie, V., Thomas, M., Muthamia, Z. K., & Leclerc, C. (2016). Seed exchange networks, ethnicity, and sorghum diversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(1), 98-103. <https://doi.org/10.1073/pnas.1513238112>
- [43] Nemogá, G. R. (2016). Diversidad biocultural: innovando en investigación para la conservación. *Acta biológica colombiana*, 21(1), 311-319. <https://www.redalyc.org/pdf/3190/319049262012.pdf>
- [44] Montaña, M. E., Sanabria-Diago, O. L., Manzano, R., & Quilindo, O. (2021). Ruta biocultural de conservación de las semillas nativas y criollas en el territorio indígena de Puracé, Cauca. *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, 24(1). <https://doi.org/10.31910/rudca.v24.n1.2021.1771>
- [45] Huambachano, M. A. (2019). Soberanía alimentaria indígena: Recuperando el alimento como medicina sagrada en Aotearoa Nueva Zelanda y Perú. *New Zealand Journal of Ecology*, 43(3). <https://doi.org/10.20417/nzjecol.43.42>

- [46] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2011). Semillas en emergencias: manual técnico. FAO. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/29be0477-eb32-4a34-a341-9b75b5ffe577/content>
- [47] Patiño Moscoso, M. A., Flórez Gómez, D. L., Hernández Nopsa, J. F., Castro Jiménez, A., González Almarío, C., Forero Camacho, C. A., Vargas Ramírez, D. N., Cañar Serna, D. Y., Méndez Molano, E., Rodríguez Yzquierdo, G. A., Jiménez Sabogal, H. R., Valencia Sánchez, J. S., Ramírez Durán, J., Osorio Guerrero, K. V., Sarmiento Moreno, L. F., Medina Mérida, M. J., Rodríguez Mosquera, M. E., Rivera Rojas, M., Pulido Castro, S. X., y Lasso Paredes, Z. L. (2022). Lineamientos generales para la formulación, diseño y establecimiento de Bancos Locales de Semillas (BLS). *Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA)*. <https://doi.org/10.21930/agrosavia.manual.7405842>
- [48] Vernooy, R., Shrestha, P., Sthapit, B. & Ramírez, M. (2016). Bancos Comunitarios de Semillas: Orígenes, Evolución y Perspectivas. *Biodiversity International, Lima, Perú*. <https://hdl.handle.net/10568/79770>
- [49] Ramírez Durán, J., Cañar Serna, D. Y., Deantonio Florido, L. Y., & Hernández Nopsa, J. F. (2019). Manual técnico para la producción de plántulas de caña de azúcar para panela a partir de yemas individuales bajo las condiciones agroecológicas del municipio de Barbosa (Santander). *Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), Colombia*. <https://doi.org/10.21930/agrosavia.manual-17>
- [50] Arenas Rubio, I., Del Toro Aparicio, J. M., Moreno Pérez, S., Hernández Nopsa, J. F., Gutiérrez Berdugo, I. A., Berrocal Atilano, J. H., Guzmán Sánchez, L. F., Medina Mérida, M. J., Aguilar Aguilar, P. A., Soto Macea, R. J., Montero Cantillo, Y. D., & Ramírez Durán, J. (2022). Manual técnico para la producción de semilla de guandul (*Cajanus cajan* (L.) Huth) en Colombia. *Corporación colombiana de investigación agropecuaria (AGROSAVIA)*. <https://doi.org/10.21930/agrosavia.manual.7405255>
- [51] Holdridge, L. R. (1967). *Life zone ecology*. Tropical Science Center, San José, Costa Rica. <https://app.ingemmet.gov.pe/biblioteca/pdf/Amb-56.pdf>
- [52] Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2007). Estudio general de suelos y zonificación de tierras: departamento de Antioquia. Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).
- [53] International Board for Plant Genetic Resources (IBPGR); International Maize and Wheat Improvement Center (CIMMYT). (1991). Descriptors for Maize. *International Board for Plant Genetic Resources*. <https://cgspace.cgiar.org/server/api/core/bitstreams/afe74e02-40fb-4643-8960-bbd42c9a07cf/content>
- [54] McAlvay, A. C., Armstrong, C. G., Baker, J., Elk, L. B., Bosco, S., Hanazaki, N., Joseph, L., Martínez-Cruz, T. E., Nesbitt, M., Palmer, M. A., Priprá de Almeida, W. C., Anderson, J., Asfaw, Z., Borokini, I. T., Cano-Contreras, E. J., Hoyte, S., Hudson, M., Ladio, A. H., Odonne, G., ... & Vandebroek, I. (2021). Ethnobiology phase VI: decolonizing institutions, projects, and scholarship. *Journal of Ethnobiology*, 41(2), 170-191. <https://doi.org/10.2993/0278-0771-41.2.170>
- [55] Búrquez, A., Martínez-Yrizar, A., Murphy, A. D., Luque, D., Boege, E., Rodríguez Martínez del Sobral, E., López Cruz, G., Ruíz Barranco, H., Bezaury-Creel, J., Barclay Briseño, K., Barrera-Bassols, N., Alarcón-Chaires, P., de la Maza Hernández, R., Machado Macías, S., Graf-Montero, S., Rojas González de Castilla, S., & Toledo, V. M. (2018). Tópicos bioculturales. Reflexiones sobre el concepto de bioculturalidad y la defensa del patrimonio biocultural de México. (V. M. Toledo & P. Alarcón-Chaires, Eds.). *Universidad Autónoma de México, Mexico*. https://patrimoniobiocultural.com/archivos/publicaciones/libros/Topicos_bioculturales.pdf
- [56] Bell Rodríguez, R. F., Orozco Fernández, I. I., & Lema Cachinell, B. M. (2022). Interdisciplinariedad, aproximación conceptual y algunas implicaciones para la educación inclusiva. *UnianDES Episteme*, 9(1), 101-116. <https://revista.uniandes.edu.ec/ojs/index.php/EPISTEME/article/view/2518>
- [57] Gómez, F., Bueso, F., Reconco, R., Hughes-Hallett, P., Bentley, J., & Smith, M. (1995). Manual de mejoramiento y conservación del maíz criollo con pequeños agricultores. *Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Departamento de Agronomía. Centro Internacional de Tecnología de Semillas y Granos*. <https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/fc8a5b87-cafd-4cdc-9e94-6bb263711d17/content>
- [58] Herrera-Cabrera, B. E., Castillo-González, F., Sánchez-González, J. J., Hernández-Casillas, J. M., Ortega-Pazcka, R. A., & Major-Goodman, M. (2004). Diversidad del maíz Chalqueño. *Agrociencia*, 38(2), 191-206. <https://agrociencia-colpos.org/index.php/agrociencia/article/view/313/313>

- [59] Hernandez Nopsa, J. F., Daglish, G. J., Hagstrum, D. W., Leslie, J. F., Phillips, T. W., Scoglio, C., Thomas-Sharma, S., Walter, G. H., & Garrett, K. A. (2015). Ecological networks in stored grain: Key postharvest nodes for emerging pests, pathogens, and mycotoxins. *BioScience*, *65*(10), 985-1002. <https://doi.org/10.1093/biosci/biv122>
- [60] Wu, F. & Guclu, H. (2012). Aflatoxin regulations in a network of global maize trade. *PLoS One*. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0045151>
- [61] Chapman, D., Purse, B. V., Roy, H. E., & Bullock, J. M. (2017). Global trade networks determine the distribution of invasive non-native species. *Global Ecology and Biogeography*, *26*(8), 907-917. <https://doi.org/10.1111/geb.12599>
- [62] Garrett, K. A., Alcalá-Briseno, R. I., Andersen, K. F., Buddenhagen, C. E., Choudhury, R. A., Fulton, J. C., Hernandez Nopsa, J. F., Poudel, R., & Xing, Y. (2018). Network Analysis: A Systems Framework to Address Grand Challenges in Plant Pathology. In J. E. Leach & S. E. Lindow (Eds.), *Annual Review of Phytopathology*, *56*, 559-580. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-080516-035326>
- [63] Garrett, K. A., Thomas-Sharma, S., Forbes, G. A., Hernandez Nopsa, J. F., & Plex Sula, A. I. (2023). Climate Change and Plant Pathogen Invasions. In L. Ziska (Ed.), *Invasive Species and Global Climate Change 2nd Ed.* CABI. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/10.1079/9781800621459.0003>
- [64] Pautasso, M., & Jeger, M. J. (2014). Network epidemiology and plant trade networks. *AoB Plants*, *6*. <https://doi.org/10.1093/aobpla/plu007>
- [65] Marshall, M., Sutherland, R., & Hulme, P. E. (2021). Assessing the role of plant trade networks in the vulnerability of forest nurseries to plant pathogens. *Australasian Plant Pathology*, *50*(6), 671-681. <https://doi.org/10.1007/s13313-021-00816-x>
- [66] Andersen, K. F., Buddenhagen, C. E., Rachkara, P., Gibson, R., Kalule, S., Phillips, D., & Garrett, K. A. (2019). Modeling epidemics in seed systems and landscapes to guide management strategies: the case of sweet potato in Northern Uganda. *Phytopathology*, *109*(9), 1519-1532. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-03-18-0072-R>
- [67] Kumar, P. L., Cuervo, M., Kreuze, J. F., Muller, G., Kulkarni, G., Kumari, S. G., Massart, S., Mezzalama, M., Alakonya, A., Muchugi, A., Graziosi, I., Ndjiondjop, M., Sharma, R., & Negawo, A. T. (2021). Phytosanitary interventions for safe global germplasm exchange and the prevention of transboundary pest spread: the role of CGIAR germplasm health units. *Plants*, *10*(2), 328. <https://doi.org/10.3390/plants10020328>
- [68] Buddenhagen, C. E., Rubenstein, J. M., Hampton, J. G., & Rolston, M. P. (2021). The phytosanitary risks posed by seeds for sowing trade networks. *PLoS one*, *16*(11), e0259912. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0259912>
- [69] Ristaino, J. B., Anderson, P. K., Beber, D. P., Brauman, K. A., Cunniffe, N. J., Fedoroff, N. V., Finegold, C., Garrett, K. A., Gilligan, C. A., Jones, C. M., Martin, M. D., MacDonald, G. K., Neenan, P., Records, A., Schmale, D. G., Tateosian, L., & Wei, Q. (2021). The persistent threat of emerging plant disease pandemics to global food security. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *118*(23), e2022239118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2022239118>
- [70] Thomas-Sharma, S., Andrade-Piedra, J., Carvajal Yepes, M., Hernández Nopsa, J. F., Jeger, M. J., Jones, R. A. C., Kromann, P., Legg, J. P., Yuen, J., Forbes, G. A. & Garrett, K. A. (2017). A risk assessment framework for seed degeneration: Informing an integrated seed health strategy for vegetatively propagated crops. *Phytopathology*, *107*(10), 1123-1135. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-09-16-0340-R>
- [71] Thomas-Sharma, S., Abdurahman, A., Ali, S., Andrade-Piedra, J. L., Bao, S., Charkowski, A. O., Crook, D., Kadian, M., Kromann, P., Struik, P. C., Torrance, L., Garrett, K. A. & Forbes, G. A. (2016). Seed degeneration in potato: the need for an integrated seed health strategy to mitigate the problem in developing countries. *Plant Pathology*, *65*(1), 3-16. <https://doi.org/10.1111/ppa.12439>
- [72] Nduwimana, I., Sylla, S., Xing, Y., Simbare, A., Niyongere, C., Garrett, K. A., & Bonaventure Omondi, A. (2022). Banana seed exchange networks in Burundi—Linking formal and informal systems. *Outlook on Agriculture*, *51*(3), 334-348. <https://doi.org/10.1177/00307270221103288>
- [73] Indigenous Seed Keepers Network. (2019). Winona LaDuke's story of the origins to create a regional Indigenous seed keepers' network. *Indigenous Seed Keepers Network (ISKN)*. <https://www.iskn.org>

Oportunidades y retos de los programas públicos y privados de mejoramiento genético de maíz en Latinoamérica, caso México

Ricardo Ernesto Preciado-Ortiz^{1*}, María Gricelda Vázquez-Carrillo²

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Programa de Maíz región del Bajío. Celaya, Guanajuato. México.

²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Laboratorio Nacional de Calidad de Maíz. Coatlinchan, Texcoco, México.

*Autor para correspondencia / Corresponding Author, e-mail: repreciado@yahoo.com

Challenges and opportunities of public and private maize breeding programs in Latin America, case Mexico

Resumen

En Latinoamérica, los programas de mejoramiento genético de maíz, dependientes de universidades e instituciones de investigación financiadas con recursos públicos, contrastan con los programas de mejoramiento de las empresas semilleras multinacionales, nacionales y regionales en diversos aspectos como: la disponibilidad de recursos económicos; la perspectiva del mercado; el tipo de materiales mejorados; los usuarios de los materiales generados; el aprovechamiento y uso de la diversidad genética; los esquemas de mejoramiento utilizados; el término a corto, mediano y largo plazo de los proyectos de investigación; el trabajo interdisciplinario e interinstitucional; entre otros. El objetivo del presente documento es resaltar las ventajas y oportunidades para realizar proyectos de investigación, innovación y desarrollo tecnológico de alto impacto y con un horizonte más sustentable, cuyos frutos impactarán la alimentación, salud, nutrición, desarrollo agrícola y seguridad alimentaria; además de contribuir a reducir los riesgos de los efectos negativos del cambio climático; a través del capital humano altamente especializado, los recursos genéticos e infraestructura existente en las universidades e instituciones de investigación del sector público en Latinoamérica. Para implementar estos proyectos interdisciplinarios e interinstitucionales se requiere de la incidencia y participación de varios factores: a) la voluntad de interacción entre los investigadores altamente especializados en diversas disciplinas adscritos en distintas instituciones, b) la disponibilidad de las instituciones participantes que permitan la utilización de los recursos humanos, genéticos y de infraestructura, c) la disponibilidad de fuentes de financiamiento nacionales e internacionales que privilegien el trabajo interdisciplinario e interinstitucional y, d) la creación de políticas públicas que apoyen la generación de tecnología e innovación, que incidan en el desarrollo agrícola y social, partiendo de que la investigación debe ser considerada como un gasto de inversión y un bien público por los gobiernos latinoamericanos. Estas interacciones harán posible potenciar los limitados recursos de investigación. A manera de ejemplo se presentan resultados de investigación, donde a través del trabajo interdisciplinario e interinstitucional se logró la generación de conocimiento científico y la liberación de maíces especializados de alto contenido de aceite, pigmentados y pozoleros con mayor valor agregado. Así mismo se tiene la experiencia y las fuentes de germoplasma para implementar líneas de investigación para



Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /
Edited by:

María Gabriela Albán

Recibido /
Received:
02/07/2024

Aceptado /
Accepted:
19/08/2024

Publicado en línea /
Published online:
15/10/2024



obtener maíces tolerantes a las micotoxinas (*fusarium* y *aflatoxinas*), así como para buscar la eficiencia en el uso de fósforo, junto con otras líneas de investigación para generar maíces tolerantes y eficientes a factores bióticos y abióticos adversos que se están incrementando por los efectos negativos del cambio climático.

Palabras clave: Investigación interdisciplinaria e interinstitucional, maíces especializados, mayor valor agregado.

Abstract

Public-funded maize breeding programs belonging to universities and research institutions in Latin America contrast with breeding programs of regional, national, and international private seed companies in several aspects, such as research funding availability, market perspective, breeding products developed, users of products, use of maize genetic diversity, breeding schemes, short-, medium-, and long-term research projects, among others. The objective of this paper is to analyze and highlight the advantages and opportunities to implement short, medium, and long-term innovation and technological development projects with a sustainable horizon; by high impact in alimentation, health, nutrition, agricultural development, and food safety; and also to contribute to reducing the negative effects of climate change; by highly specialized researchers; and by the use of genetic resources as breeding germplasm and capacities of universities and public research institutions in Latin America. To be able to implement these interdisciplinary and interinstitutional projects it is necessary to consider the incidence and participation of several factors such as: a) the willpower for interaction between highly specialized researchers from different disciplines belonging to different institutions, b) availability of involved institutions to allow the use of human and genetic resources and their facilities, c) availability of national and international funds, privileging interdisciplinary and interinstitutional research, d) the creation of public policies to support innovation and technology generation research to impact food safety, nutrition, health, social and agricultural development, since research has to be considered an investment and a public good for Latin-American governments. As an example of medium-term interdisciplinary and interinstitutional work, it has been released high-quality, specialty, and value-added maize hybrids such as high-oil content, pigmented (blue and red) maize, and pozolero type. Also, there have been advances and sources of germplasm to implement research lines to obtain tolerant materials for mycotoxins (*aflatoxins* and *fusarium*), phosphorus use efficiency, along with other research lines to generate tolerant and efficient varieties for adverse biotic and abiotic factors produced by the negative effects of climate change.

Keywords: Interdisciplinary and interinstitutional research, specialty and value added maize.

Para que la agricultura continúe con su aportación de manera significativa en la producción, abasto y transformación de alimentos, es imperativo apuntalar e iniciar líneas de investigación que incidan en el desarrollo de tecnologías para enfrentar los efectos negativos del cambio climático, que ponen en riesgo la producción, así como el deterioro de la sanidad y calidad de los alimentos, que cada vez son más afectados por las fluctuaciones térmicas que inciden en las poblaciones de insectos plaga y vectores de enfermedades foliares y de mazorca, en especial los patógenos



que generan micotoxinas, que de manera preocupante ponen en alto riesgo la salud humana. Además, la precipitación pluvial, cada día más errática, incrementa los riesgos de estrés hídrico en los cultivos, añadido al encarecimiento y menor disponibilidad de agua para riego. Ante estos escenarios, queda en entredicho la sustentabilidad de la agricultura empresarial altamente tecnificada, que, para obtener mayores potenciales de rendimiento, requiere intensificar el uso de labranza, irrigación e insumos derivados de procesos industriales.

Probablemente el maíz es uno de los cultivos que más se ha investigado a nivel mundial, sin embargo, por sus características genéticas y amplia variabilidad, cada día es posible plantear nuevos retos para incrementar la producción, sanidad y calidad de los alimentos, y el valor agregado, así como reducir costos y riesgos de producción [1]. La mayoría de estos retos son factibles de enfrentar a través de un trabajo de investigación interdisciplinario e interinstitucional que permita aprovechar la diversidad genética, los mecanismos hereditarios, los esquemas de mejoramiento, así como nuevas herramientas tecnológicas de laboratorio para asistir la selección de maíces que impacten en las diversas cadenas de valor.

En Latinoamérica, los programas de mejoramiento genético de maíz dependientes de universidades e instituciones de investigación financiadas con recursos públicos, contrastan con los programas de mejoramiento de las empresas semilleras multinacionales, nacionales y regionales en una serie de aspectos, entre los que se encuentran: la disponibilidad de recursos económicos, la perspectiva del mercado, el desarrollo de materiales mejorados, los usuarios de los materiales generados, el aprovechamiento y uso de la diversidad genética existente, los esquemas de mejoramiento utilizados, el término a corto, mediano y largo plazo de los proyectos de investigación, el trabajo interdisciplinario e interinstitucional, entre otros.

El objetivo del presente documento es resaltar las ventajas y oportunidades para realizar proyectos de investigación, innovación y desarrollo tecnológico de alto impacto y con un horizonte más sustentable, cuyos frutos impactarán en la alimentación, salud, nutrición, desarrollo agrícola y seguridad alimentaria, además de contribuir a reducir los riesgos de los efectos negativos del cambio climático, a través del capital humano altamente especializado, los recursos genéticos y la infraestructura existente en las universidades e instituciones de investigación del sector público en Latinoamérica.

La investigación, innovación y desarrollo tecnológico agrícola en general y de maíz en particular que se realiza en universidades e instituciones de investigación pública se debe considerar como un gasto de inversión y un bien público por los gobiernos latinoamericanos [2], cuyos frutos a corto, mediano y largo plazo impactarán en la alimentación, salud, nutrición, desarrollo agrícola y seguridad alimentaria de Latinoamérica, además de contribuir a reducir los riesgos de los efectos negativos del cambio climático.

Ante la problemática anterior, en la tabla 1 se presenta de manera comparativa algunos aspectos importantes entre el trabajo que se realiza en los programas de investigación de universidades e instituciones de investigación del sector público con los programas financiados por el sector privado, cuyos objetivos son meramente comerciales y poco



sustentables en el futuro, debido a que están enfocados al desarrollo de tecnologías del tipo Revolución Verde (con uso intensivo de fertilizantes, pesticidas, riegos y semilla híbrida), alejándose de su carácter de bien público y de las necesidades tecnológicas del “paradigma de sostenibilidad” (que hace énfasis en el manejo de los recursos naturales) [2].

Tabla 1. Aspectos comparativos importantes entre los programas de mejoramiento genético de maíz de universidades e instituciones de investigación del sector público y las empresas del sector privado en América Latina.

Aspectos		Universidades e instituciones de investigación pública	Empresas semilleras privadas
1	Disponibilidad de recursos económicos.	Escasa, limitada y competida.	Mayor disponibilidad.
2	Perspectiva del mercado.	Enfoque alimentario, social, salud y económico.	Enfoque comercial.
3	Tipo de germoplasma desarrollado.	Germoplasma de maíz resistente a factores bióticos y abióticos, diferenciados, nutraceuticos y con mayor valor agregado.	Maíces de alto rendimiento altamente demandantes de insumos.
4	Usuarios de los materiales generados.	Agricultura tradicional y de subsistencia así como programas de mejoramiento públicos y privados.	Productores empresariales.
5	Aprovechamiento y uso de la diversidad genética existente en maíz.	Alta.	Baja.
6	Esquemas de mejoramiento utilizados.	Mejoramiento participativo, Pre-mejoramiento, selección recurrente, e hibridación.	Hibridación.
7	Duración de los proyectos de investigación.	Corto, mediano y largo plazo.	Corto plazo.
8	Interacción interdisciplinaria e interinstitucional (equipos de laboratorio modernos y herramientas biotecnológicas).	Alta.	Baja.

Entre los aspectos descritos, se detallan algunas diferencias en ambos tipos de programas:

1. No obstante que se han registrado tasas de retorno superiores al 40 % en la inversión en la investigación agropecuaria [2], la disponibilidad de recursos económicos para la investigación en los programas de universidades e instituciones de investigación del sector público generalmente es escasa, limitada y competida en la mayoría de los países latinoamericanos. Esto se debe a: reducciones presupuestarias de los gobiernos por austeridad fiscal; incomprensión de los tomadores de decisión nacionales del papel crucial de la agricultura en las políticas de desarrollo; falta de reconocimiento de la naturaleza de la investigación agropecuaria como bien



público; retiro del apoyo de los donantes; disminución a largo plazo en los precios de los productos agropecuarios básicos, que desalienta la inversión en el sector agropecuario; entre otros [2]. Una comparación de los sistemas de investigación agropecuaria en Latinoamérica fue realizada con base en la inversión de los países en investigación y desarrollo, en donde México ocupa una posición intermedia, superado ampliamente por Brasil y Argentina. [3] En cambio, las empresas privadas —sobre todo las multinacionales— que son activas en los mercados de insumos agropecuarios pueden fraccionar los costos fijos por medio de muchos mercados nacionales de productos. Además, como tienen acceso a los mercados financieros mundiales, con frecuencia pueden llegar, en forma más fácil y económica, al capital empresarial y de riesgo para la financiación de la investigación [2].

2. La perspectiva del mercado en universidades e instituciones de investigación del sector público normalmente tiene un enfoque de tipo social, cuyos productos de investigación pueden ser definidos con el término *innovación social*, partiendo de que toda innovación se relaciona con el factor social como solución a los problemas a resolver de forma colectiva y participativa para atender el bienestar y estabilidad de la sociedad. Por lo tanto, la innovación social debe ser impulsada por instituciones públicas, educativas y centros de investigación para buscar estar a la vanguardia y al nivel de otros países desarrollados [4]. Los objetivos de la investigación buscan impactar en la producción, la alimentación, la calidad y sanidad de los alimentos, el valor agregado, así como el desarrollo de germoplasma para enfrentar los riesgos del cambio climático y su inestabilidad; a medida que la prioridad que tienen la investigación y el desarrollo tecnológico va más allá de la búsqueda de incrementos de la productividad, es decir, hacia objetivos como la calidad del producto y la protección ambiental, habrá entonces demanda de un conjunto nuevo de bienes públicos [2]; En cambio, normalmente, el objetivo de las empresas privadas es más comercial y enfocado a mercados de agricultura empresarial de alta producción sin restricciones en el manejo de insumos.
3. El desarrollo de germoplasma mejorado en universidades e instituciones de investigación del sector público presenta la oportunidad de generar fuentes de germoplasma con mayor valor nutritivo, nutracéutico, funcional, eficiente y resistente a factores bióticos y abióticos a través de esquemas de mejoramiento a mediano y largo plazo, con miras a enfrentar los riesgos del cambio climático y su inestabilidad. En cambio, en las empresas privadas, el desarrollo de germoplasma es mínimo, ya que normalmente su objetivo es a corto plazo, a través de la generación de nuevas combinaciones de híbridos con mayor potencial de rendimiento adaptados a sistemas de producción altamente demandantes de insumos, labranza y riego.
4. Los usuarios de los materiales generados por las universidades e instituciones de investigación del sector público normalmente son pequeños productores que practican agricultura tradicional y de subsistencia, y que, a través de esquemas de autoabastecimiento de semilla de híbridos y variedades de polinización libre, constituyen un recurso y no un insumo dentro del sistema de producción; o bien, programas de mejoramiento públicos y privados interesados en utilizar el germoplasma desarrollado en esquemas de mediano y largo plazo como fuente



de mejoramiento genético. En el caso de las empresas privadas —sobre todo las multinacionales— sus usuarios son productores altamente tecnificados sin restricciones de maquinaria, equipo, riego y utilización de insumos.

5. Aprovechamiento y uso de la diversidad genética existente en maíz: las universidades e instituciones de investigación del sector público tienen la oportunidad de utilizar los materiales nativos como fuente de germoplasma para desarrollar maíces diferenciados con mayor valor agregado que sean de interés para usos específicos. En las empresas privadas —sobre todo las multinacionales— normalmente manejan una base genética muy restringida, donde utilizan esquemas de reciclaje de líneas a través del método genealógico, por lo que el uso de la diversidad genética es menor.
6. Los esquemas de mejoramiento utilizados por las universidades e instituciones de investigación del sector público se enfocan en el desarrollo de germoplasma a través de la utilización de esquemas de mejoramiento participativo y pre-mejoramiento en materiales nativos, selección recurrente e hibridación en diversas fuentes de germoplasma, que permiten la generación de materiales genéticos para su siembra por productores en distintos sistemas de producción, así como para utilizarlos de fuente de germoplasma en programas de mejoramiento genético. En las empresas privadas —sobre todo las multinacionales— normalmente el esquema de mejoramiento utilizado es la hibridación.
7. Las universidades e instituciones de investigación del sector público tienen la oportunidad de plantear esquemas de trabajo a corto, mediano y largo plazo, en los que es posible desarrollar germoplasma con características diferenciadas, así como poblaciones eficientes y resistentes a diversos factores bióticos y abióticos producidos por el cambio climático y su inestabilidad, a través de esquemas de selección recurrente. En cambio, en las empresas privadas, los mejoradores tienen la presión de sacar nuevas combinaciones híbridas más productivas que superen a las anteriores en el menor plazo posible y difícilmente invierten en esquemas de selección a largo plazo que les permitan generar germoplasma para enfrentar riesgos de producción en el futuro.
8. En la actualidad, en diversas instituciones de investigación y enseñanza del país se han fortalecido y consolidado varios grupos de investigación con investigadores altamente especializados en diversas disciplinas, como química de alimentos, tecnología de alimentos, salud, nutrición humana y animal, biotecnología, desarrollo de productos industriales, entre otros. Estos han aportado al mundo nuevo conocimiento científico y tecnológico con un impacto en la salud y alimentación de la población mundial. También, dichos grupos de investigación cuentan con la infraestructura y equipos modernos que les permiten asistir en la selección de productos bioactivos, biofortificados y nutraceuticos a partir de maíces especializados, de tal manera que la interacción interdisciplinaria e interinstitucional con los programas de mejoramiento genético para aprovechar los materiales genéticos desarrollados nos da la oportunidad para integrar proyectos a nivel nacional e internacional que tengan un impacto de gran alcance en la alimentación y salud de los consumidores, así como en la industria pecuaria y de transformación.



Además, la estrategia de trabajo interdisciplinario e interinstitucional hará posible potenciar la investigación ante los limitados recursos disponibles para investigación. Con respecto a las empresas privadas, por lo general, debido a que manejan pactos de secrecía internos relacionados con métodos y procesos que deriven en la propiedad intelectual de la empresa [5], carecen de la oportunidad de interacción interinstitucional y la posible interacción interdisciplinaria se debe circunscribir de manera interna entre los empleados de la misma empresa.

No obstante la gran importancia de la disponibilidad y gestión de fuentes de financiamiento para la investigación, este tema resulta muy complejo y fuera de nuestro alcance; por lo que en este documento se pretende enfatizar en las grandes ventajas de capital humano altamente especializado, recursos genéticos e infraestructura de las instituciones públicas para realizar proyectos de investigación, innovación y desarrollo tecnológico de alto impacto y con un horizonte más sustentable que la investigación realizada por las empresas privadas. Para implementar estos proyectos interdisciplinarios e interinstitucionales se requiere de la incidencia y participación de varios factores: a) la voluntad de interacción entre los investigadores altamente especializados en diversas disciplinas adscritos a distintas instituciones, b) la disponibilidad de las instituciones participantes que permitan la utilización de los recursos humanos, genéticos y de infraestructura, c) la disponibilidad de fuentes de financiamiento nacionales e internacionales que privilegien el trabajo interdisciplinario e interinstitucional y, d) la creación de políticas públicas que incidan en la generación de tecnología e innovación que impacte la seguridad alimentaria, la nutrición, la salud y el desarrollo agrícola y social en nuestros países.

Con base en los aspectos descritos anteriormente, se presentan algunos ejemplos de experiencias, resultados y logros a través de la interacción interdisciplinaria e interinstitucional entre investigadores adscritos a instituciones públicas de investigación y universidades en México. A través de diversas líneas de investigación, se ha presentado la oportunidad de implementar proyectos a mediano y largo plazo con la intención de tener un impacto en el desarrollo agrícola y social; además de que, con estas interacciones, se ha contribuido a la formación de recursos humanos a nivel posgrado.

Tal es el caso del desarrollo de maíces con alto contenido de aceite (ACA), que buscan impactar en la alimentación humana y pecuaria. Estos maíces fueron generados a través de un esquema de selección recurrente (SR) asistida con espectrofotometría de rayos infrarrojos cercanos (NIRS) en cuatro poblaciones contrastantes en color de grano (blanco y amarillo) y adaptación (Bajío y Noroeste de México). La respuesta a la selección a través de ocho ciclos de SR, en las cuatro poblaciones, se tuvo un incremento en el contenido de aceite de 4 % en C_0 a más de 8 % en C_8 [6]. Adicionalmente a través de interacciones con investigadores del Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM) se estudió el perfil de ácidos grasos a través de los ciclos de selección en las cuatro poblaciones estudiadas [7] y [8], así como el contenido de tocoferoles, fitoesteroles y carotenoides [9].

En ciclos avanzados de selección en las cuatro poblaciones de ACA, se derivaron líneas doble haploides (LDH) con la intención de generar a corto plazo híbridos de ACA. Estas LDH fueron obtenidas a través de la interacción con el Centro Internacional de



Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) donde se utilizó el procedimiento siguiente: 1) Inducción de haploidía, en el que la polinización es por medio de la cruce del germoplasma fuente (poblaciones de ACA) con el polen del inductor de haploidía RWS x UH400 de origen alemán, 2) identificación de semilla con haploidía usando el marcador Navajo $R_1 - n_j$, 3) duplicación de los cromosomas con un inhibidor mitótico (colchicina) y 4) autofecundación de las plantas duplicadas para incrementar la semilla de las nuevas líneas generadas [10].

A través de estudiantes de posgrado del Tecnológico Nacional de México, Campus Roque (TecNM-Roque), y en interacción con sus profesores, se planteó una metodología para la selección de LDH por su comportamiento agronómico *per se* en diversas localidades y a través de cruzamientos de prueba, con el fin de identificar líneas superiores con buena respuesta heterótica y buen comportamiento agronómico [11]. Posteriormente, del grupo de LDH superiores seleccionado de las cuatro poblaciones se realizaron esquemas de cruzamientos dialélicos para identificar líneas de grano blanco [12] y para líneas de grano amarillo [13] con buena aptitud combinatoria. Esta información sentó las bases para la formación, desarrollo, evaluación y liberación del híbrido trilineal de ACA de grano amarillo H-327 AO [14], de los híbridos trilineales ACA de grano blanco H-388 O [15] y H-389 O [16] y recientemente el híbrido de cruce doble H-393 O [17]. Todos ellos adaptados a las regiones subtropicales de México.

En esta misma línea de investigación de ACA se han realizado trabajos en interacción con investigadores de la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ), donde se estudió la bioaccesibilidad y capacidad antioxidante en compuestos fenólicos y oligosacáridos en chips de maíz con frijol [18] y con el Centro de Investigación y Estudios Avanzados de Querétaro (CINVESTAV-QRO), donde fueron estudiados los ácidos grasos y propiedades del almidón de híbridos de ACA durante su proceso de nixtamalización y el proceso de elaboración de tortillas [19]. Los maíces de ACA tienen un impacto en la calidad de grano que permite obtener productos nixtamalizados con características reológicas superiores [20]; también, por su mayor valor energético, pueden tener un impacto en la elaboración de alimentos balanceados para la avicultura y porcicultura; finalmente, constituyen una excelente fuente de materia prima para la elaboración de alimentos industrializados.

Otro ejemplo del trabajo de interacción entre los investigadores que trabajan en mejoramiento genético con investigadores de diversas instituciones y disciplinas en México tiene que ver con la generación de maíces especializados que permiten el aprovechamiento de los recursos genéticos, y que pueden aportar beneficios a la salud de los consumidores por sus características bioactivas, biofortificadas y nutraceuticas, y que por su mayor valor agregado pueden impactar en el desarrollo agrícola de regiones específicas [21].

Entre este tipo de maíces de mayor valor agregado, se han realizado trabajos con maíces pozoleros (utilizados para elaborar un platillo típico mexicano llamado pozole) en interacción con investigadores del ITESM, donde se estudió la presencia de ácidos fenólicos y actividad antioxidante en maíces pozoleros [22]. En interacción con investigadores de la UAQ, se estudió el efecto del complejo amilosa lípidos en la elaboración de pozole [23].



En el grupo de calidad del propio INIFAP, estos maíces fueron caracterizados por su rendimiento de grano, propiedades físicas y reológicas y contenido de antocianinas [24]; así como la calidad de grano floreado y contenido de fitoquímicos [25]. Uno de los frutos de estos trabajos con maíces pozoleros fue el registro y liberación del híbrido no convencional de maíz pozolero H-302 PZ adaptado a regiones subtropicales de México. R. Preciado-Ortiz (datos sin publicar) [26].

En otra investigación en interacción con el ITESM se determinó el perfil nutraceutico en maíces pigmentados de grano azul y rojo, [27]. En esta línea de investigación, se formaron, desarrollaron, evaluaron y liberaron los híbridos trilineales de maíz de grano azul H-303 Zahie (R. Preciado-Ortiz, datos sin publicar) [28] y de grano rojo H 304 R, (R. Preciado-Ortiz, datos sin publicar) [29], adaptados a regiones subtropicales de México.

Los ejemplos de líneas de investigación anteriores han tenido resultados favorables y con un impacto tanto en los productores como en los consumidores; sin embargo, aún nos encontramos lejos de tener resultados sistemáticos y extensivos con impactos que puedan incidir en diversas regiones y países.

Por otro lado, ya se han identificado y desarrollado fuentes de germoplasma para iniciar nuevas líneas de investigación a través de proyectos interdisciplinarios e interinstitucionales para la obtención de maíces eficientes en el uso de fósforo a través de la interacción con la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH) [30], [31] y [32]; en interacción con la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), para la generación de maíces tolerantes a micotoxinas (*aflatoxinas* y *fusarium*) [33]; así mismo, para generar maíces tolerantes y eficientes a factores bióticos y abióticos adversos que se están incrementando por los efectos negativos del cambio climático.

A manera de conclusión, se puede decir que existe una oportunidad de realizar trabajos de investigación interdisciplinaria e interinstitucional que involucre investigadores especialistas en diversas disciplinas, adscritos a instituciones públicas en Latinoamérica. Además, con estos trabajos de interacción será posible potenciar las limitadas fuentes de financiamiento, y permitirán implementar proyectos de investigación, innovación y desarrollo tecnológico de alto impacto, con un horizonte más sustentable, y cuyos frutos impactarán en la alimentación, salud, nutrición, desarrollo agrícola y seguridad alimentaria, además de contribuir a reducir los riesgos de los efectos negativos del cambio climático.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al proyecto Tecnologías de frontera para impulsar la producción sostenible de maíz en las Américas -Tech Maíz- financiado por el programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo - CYTED- y la Red Latinoamericana del Maíz por gestionar la elaboración y publicación de este artículo. También, se agradece a todos los investigadores, estudiantes y personal de apoyo de todas las instituciones que han participado en diversas etapas para la generación de los híbridos que han sido generados.



CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Ricardo Ernesto Preciado-Ortiz, elaboró el manuscrito y desarrolló en campo el material genético descrito en el documento; María Gricelda Vázquez-Carrillo participó en la elaboración del manuscrito y asistió la selección en laboratorio del material genético descrito en el documento.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de interés en el presente trabajo.

REFERENCIAS

- [1] Preciado-Ortiz, R. E., & Vázquez-Carrillo, M. G. (2022). Generación de maíces especializados para mejorar la salud y nutrición en México. *Avances en Ciencias e Ingenierías*, 14(1). <https://doi.org/10.18272/aci.v14i1.2489>
- [2] Echeverría, R. G., Trigo, E. J., & Byerlee, D. (1996). Institutional change and effective financing of agricultural research in Latin America. (Technical Paper No. 330). *World Bank*. <https://shorturl.at/PJeFb>
- [3] Nin-Pratt, A., Stads, G.-J., de los Santos, L., & Muñoz, G. (2023). Desatando la innovación: Evaluación del papel de la I+D agropecuaria en América Latina y el Caribe. <http://dx.doi.org/10.18235/0005006>
- [4] Moreno-Ortiz, A. L. (2023). Importance of agricultural activity and social innovation in public research centers: a bibliometric analysis. *Scientia et Praxis*, 3(05). <https://doi.org/10.55965/setp.3.05.a1>
- [5] Salazar, S., & Henríquez, P. (2020). Guía para la gestión de la propiedad intelectual en consorcios regionales de investigación agrícola. *Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura*. <https://repositorio.iica.int/bitstream/handle/11324/8195/BVE19040294e.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [6] Ortega-Corona, A., Picón-Rico, R., Preciado-Ortiz, R. E., Terrón-Ibarra, A. D., Guerrero-Herrera, M. J., García-Lara, S., & Serna-Saldivar, S. O. (2015). Selection response for oil content and agronomic performance in four subtropical maize populations. *Maydica*, 60, 1-8. <https://core.ac.uk/outputs/230662315/?source=oi>
- [7] Preciado-Ortiz, R. E., García-Lara, S., Ortiz-Islas, A., Ortega-Corona, A., & Serna-Saldivar, S. O. (2013). Response of recurrent selection on yield, kernel oil content and fatty acid composition of subtropical maize populations. *Field Crops Research*, 142, 27-35. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.11.019>
- [8] Ortiz-Islas, S., García-Lara, S., Preciado-Ortiz, R. E., & Serna-Saldivar, S. O. (2018). Fatty acid composition and proximate analysis of improved high-oil corn double haploid hybrids adapted to subtropical areas. *Cereal Chemistry* 96(2), 182-192. <https://doi.org/10.1002/cche.10109>
- [9] García-Lara, S., Rodríguez-Treviño, A., Ortiz-Islas, S., Preciado-Ortiz, R. E., & Serna-Saldivar, S. O. (2023). Increase of tocopherols, phytosterols, and carotenoids in high-oil subtropical maize after recurrent selection. *Cereal Chemistry* 100(6), 1379-1389. <https://doi.org/10.1002/cche.10720>
- [10] Prasanna, B. M., Chaikam, V., & Mahuku, G. (2012). Doubled haploid technology in maize breeding: Theory and practice. *CIMMYT*.
- [11] Silva-Venancio, S., Preciado-Ortiz, R. E., Covarrubias-Prieto, J., Ortiz-Islas, S., Serna-Saldivar, S. O., García-Lara, S., Terrón-Ibarra, A. D., & Palacios-Rojas, N. (2019). Identification of superior doubled haploid maize (*Zea mays*) inbred lines derived from high oil content subtropical populations. *Maydica*, 64, 1-11. <https://core.ac.uk/download/pdf/230663341.pdf>
- [12] Picón-Rico, R., Preciado-Ortiz, R. E., Cervantes-Ortiz, F., Covarrubias-Prieto, J., & Terrón-Ibarra, A. (2018). Efectos heteróticos en líneas doble haploides de maíz de grano blanco y alto contenido de aceite. *Revista Fitotecnica Mexicana*, 41(2), 177-186. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-73802018000200177&script=sci_arttext
- [13] Picón-Rico, R., Preciado-Ortiz, R. E., Cervantes-Ortiz, F., Covarrubias-Prieto, J., & Terrón-Ibarra, A. (2018). Efectos genéticos en líneas doble haploides de maíz de grano amarillo y alto contenido de aceite. *Revista Fitotecnica Mexicana*, 41(3), 301-310. <https://doi.org/10.35196/rfm.2018.3.301-310>
- [14] Preciado-Ortiz, R. E., Terrón-Ibarra, A. D., Vázquez-Carrillo, M. G., Gómez-Montiel, N. O., & Briones-Reyes, D. (2019). H-327 AO, híbrido trilineal de maíz oleoso de grano amarillo para regiones subtropicales de México. *Revista Fitotecnica Mexicana*, 42(3), 313-315. <https://doi.org/10.35196/rfm.2019.3.313>
- [15] Preciado-Ortiz, R. E., Terrón-Ibarra, A. D., Vázquez-Carrillo, M. G., Gómez-Montiel, N. O., Briones-Reyes, D., & Peña-Ramos, A. (2019). H-388 O, híbrido trilineal de maíz de grano blanco oleoso para el subtropico de México. *Revista Fitotecnica Mexicana*, 42(3), 309-311. <https://doi.org/10.35196/rfm.2019.3.309>
- [16] Preciado-Ortiz, R. E., Terrón-Ibarra, A. D., Vázquez-Carrillo, M. G., Gómez-Montiel, N. O., Briones-Reyes, D., & Peña-Ramos, A. (2019). H-389 O, híbrido trilineal de maíz de grano blanco oleoso adaptado a regiones subtropicales de México. *Revista Fitotecnica Mexicana*, 42(3), 183-185. <https://doi.org/10.35196/rfm.2019.2.183>
- [17] Silva-Venancio, D. M., Preciado-Ortiz, R. E., Vázquez-Carrillo, M. G., & Terrón-Ibarra, A. D. (2023). Ventajas productivas en la región del Bajío del H-393 O híbrido de cruce doble de maíz (*Zea mays*, L.), de grano blanco con alto contenido de aceite. *Revista Tecnológica CEA: Número especial*, 8(23), 1476-1485. <https://revistatecnologicaceamx/revista22/>

- [18] Luzardo-Ocampo, I., Campos-Vega, R., Gaytán-Martínez, M., Preciado-Ortiz, R. E., Mendoza, S., & Loarca-Piña, G. (2017). Bioaccessibility and antioxidant activity of free phenolic compounds and oligosaccharides from corn (*Zea mays L.*) and common bean (*Phaseolus vulgaris L.*) chips during in vitro gastrointestinal digestion and simulated colonic fermentation. *Food Research International*, 100, 304-311. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.07.018>
- [19] Preciado-Ortiz, R. E., Vázquez-Carrillo, M. G., Figueroa-Cárdenas, J. D., Guzmán-Maldonado, S. H., Ramos, D. S., & Topete-Betancourt, A. (2018). Fatty acids and starch properties of high-oil maize hybrids during nixtamalization and tortilla-making process. *Journal of Cereal Science*, 83, 171-179. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2018.08.015>
- [20] Vázquez-Carrillo, M. G., Preciado-Ortiz, R. E., Santiago-Ramos, D., Palacios-Rojas, N., Terrón-Ibarra, A. D., & Hernández-Calette, A. (2018). Estabilidad del rendimiento y calidad de grano y tortilla de nuevos híbridos de maíz con valor agregado para el subtropico de México. *Revista Fitotecnica Mexicana*, 41, 509-518.
- [21] Hellin, J., Keleman, A., López, D., Donnet, L., & Flores, D. (2013). La importancia de los nichos de mercado: Un estudio de caso del maíz azul y del maíz para pozole en México. *Revista Fitotecnica Mexicana*, 36(3), 315-328. <https://doi.org/10.35196/rfm.2013.3-53-A.315>
- [22] Peralta-Veran, L., Espinosa-Leal, C., Escalante-Aburto, A., Preciado-Ortiz, R. E., Puente-Garza, C. A., Serna-Saldivar, S. O., & García-Lara, S. (2022). Effects of pozole broth production on phenolic acids and antioxidant activity of specialty maize landraces. *Journal of Cereal Science*, 107, 103543. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2022.103543>
- [23] Dorantes-Campuzano, M. F., Cabrera-Ramírez, A. H., Rodríguez-García, M. E., Palacios-Rojas, N., Preciado-Ortiz, R. E., Luzardo-Ocampo, I., & Gaytán Martínez, M. (2022). Effect of maize processing on amylose-lipid complex in pozole, a traditional Mexican dish. *Applied Food Research*, 2(1), 100078. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.100078>
- [24] Preciado-Ortiz, R. E., Ochoa-Centeno, N. J., Vázquez-Carrillo, M. G., Santiago-Ramos, D., & Terrón-Ibarra, A. D. (2022). Grain yield, physical and pasting properties, and anthocyanins of non-conventional pigmented corn hybrids for pozole end-use adapted to subtropical regions. *Applied Food Research*, 2(2), 100180. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.100180>
- [25] García-Cruz, L., Vázquez-Carrillo, M. G., & Preciado-Ortiz, R. E. (2023). Flowered grain quality and phytochemical content of non-conventional maize hybrids from the Mexican subtropics across three growing cycles. *Plants*, 12(14), 2691. <https://doi.org/10.3390/plants12142691>
- [26] Preciado-Ortiz, R. E., Vázquez-Carrillo, M. G., & Terrón-Ibarra, A. D. (2024). H-302 PZ, híbrido no convencional de maíz pozolero de grano rojo para regiones subtropicales de México. *Revista Fitotecnica Mexicana* (en prensa).
- [27] Urias-Peraldí, M., Gutiérrez-Urbe, J. A., Preciado-Ortiz, R. E., Cruz-Morales, A. S., Serna-Saldivar, S. O., & García-Lara, S. (2013). Nutraceutical profile of improved blue maize (*Zea mays*) hybrids for subtropical regions. *Field Crops Research*, 141(1), 69-76. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.11.008>
- [28] Preciado-Ortiz, R. E., Vázquez-Carrillo, M. G., & Terrón-Ibarra, A. D. (2024). H-303 Zahie, híbrido trilineal de maíz de grano azul adaptado a regiones subtropicales de México. *Revista Fitotecnica Mexicana* (en prensa).
- [29] Preciado-Ortiz, R. E., Vázquez-Carrillo, M. G., & Terrón-Ibarra, A. D. (2024). H-304 R, híbrido trilineal de maíz de grano rojo adaptado a regiones subtropicales de México. *Revista Fitotecnica Mexicana* (en prensa).
- [30] Bayuelo-Jiménez, J. S., & Bravo-Hernández, N. L. (2011). Eficiencia fósforo en maíz criollo de la Meseta Purhépecha, Michoacán. En R. E. Preciado-Ortiz & S. Montes (Eds.), *Amplitud, mejoramiento, usos y riesgos de la diversidad genética de maíz en México* (pp. 223-239). *Sociedad Mexicana de Fitogenética A.C.*
- [31] Flores-Torres, E., Ochoa-Cadavid, I., Preciado-Ortiz, R. E., & Bayuelo-Jiménez, J. S. (2016). Variabilidad genotípica en maíz nativo para eficiencia y respuesta a fósforo en etapa de floración. *Revista Fitotecnica Mexicana*, 39(4), 339-347. <https://doi.org/10.35196/rfm.2016.4.339-347>
- [32] Ochoa-Cadavid, I., Preciado-Ortiz, R. E., & Bayuelo-Jiménez, J. S. (2019). Interacción Genotipo × Ambiente y estabilidad en rendimiento de variedades de maíz en condiciones contrastantes de fósforo. *Agrociencia*, 53(3), 337-353. <https://www.agrociencia-colpos.org/index.php/agrociencia/article/view/1788>
- [33] Sánchez-Isordia, N. D., Preciado-Ortiz, R. E., Covarrubias-Prieto, J., Terrón-Ibarra, A. D., Reyes-Méndez, C. A., Gómez-Montiel, N. O., García-Perea, M. A., Ramírez-Pimentel, J. G., & Moreno Martínez, E. (2019). Yield potential and aflatoxin resistance in subtropical maize hybrids. *Environmental Analysis & Ecology Studies*, 7(1). <https://doi.org/10.31031/EAES.2020.07.000654>

Estudio de la eficiencia productiva del maíz (*Zea mays* L.) amiláceo y duro en el Ecuador

Mario Caviedes¹, Maria Gabriela Albán¹, José Velásquez², Francisco Carvajal¹

¹ Universidad San Francisco de Quito, Colegio de Ciencias e Ingenierías, Cumbayá, Ecuador.

² Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias, Estación Experimental Santa Catalina, Mejía, Ecuador.

*Autor para correspondencia/ corresponding author, e-mail: mcaviedes@usfq.edu.ec

Study of the productive efficiency of amylaceous and hard corn (*Zea mays* L.) in Ecuador

Abstract

In Ecuador, corn production is mainly concentrated in the tropical and Andean regions, with variations in grain texture, color, production levels, and productivity. The objective of this study was to estimate the efficiency of corn production and productivity, as well as seed production in the two most important geographic regions of Ecuador. To make these estimates, a simple regression analysis ($p \leq 0.05$) was used, considering the crop cycle as independent variables and production, grain productivity, and seed production as dependent variables. It is estimated that the planted area for 2023 was 362,196 hectares, with hard yellow and amylaceous corn. In the coastal region, the main producing provinces are Los Ríos and Manabí, which contribute 73 % of the total production of hard yellow corn; and in the Andean region, production is mainly located in the provinces of Bolívar, Chimborazo, and Cotopaxi, which account for 82 % of the national production of amylaceous corn. The productivity of the two types of corn varies. Hard yellow corn had an average of 4.17 ha⁻¹ from 2018 to 2023, while amylaceous corn had an average of 1.31 ha⁻¹ from 2018 to 2022. Over the next five years, an annual increase of 8.8 % in amylaceous corn productivity is estimated, while over the next six years, the productivity of hard yellow corn is projected to increase by 3.0 % annually. Seed is one of the most important components of agricultural production, and its production costs are an indicator of the rural environment. The supply is limited in the Andean region: projections indicate an annual increase of 5.8 % over the next five years. In the coastal region, the supply and demand for seed is covered by private companies, and there is no deficit for this important component of production. One of the types of corn that will have higher demand is black corn, due to its high nutritional value. The profitability estimates for the production of quality seed of this type of corn, with a benefit/cost ratio between 1.58 and 1.70, indicate that the production of black amylaceous corn seed is profitable.

Keywords: starchy corn, hard corn, production, productivity, tropical region, andean region, profitability, seed.

Resumen

En el Ecuador, la producción de maíz se localiza principalmente en las regiones tropical y Andina, con variaciones en la textura, en el color del grano, en sus niveles de producción y de productividad. Este estudio tuvo como objetivo estimar la eficiencia de la producción y productividad del maíz y de la producción de semilla en las dos regiones geográficas más



Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /
Edited by:
Eva O.L. Lantsoght

Recibido /
Received:
24/07/2024

Aceptado /
Accepted:
28/11/2024

Publicado en línea /
Published online:
16/12/2024



importantes del Ecuador. Para realizar estas estimaciones se utilizó un análisis de regresión simple ($p \leq 0.05$) considerando como variables independientes los ciclos del cultivo anual, y como variables dependientes, la producción, la productividad del grano y la semilla. Se estima que el área sembrada para el año 2023 fue de 362 196 hectáreas, con maíces amarillos duro y amiláceos. En la región litoral, las principales provincias productoras son Los Ríos y Manabí, que aportan con el 73 % del total de la producción de maíz amarillo duro; y en la región andina, la producción está localizada principalmente en las provincias de Bolívar, Chimborazo y Cotopaxi, las cuales aportan con el 82 % de la producción nacional de maíz amiláceo. Las productividades de los dos tipos de maíz varían. El amarillo duro tuvo un promedio de $4,17 \text{ t ha}^{-1}$ en el período 2018-2023, mientras que el amiláceo tuvo un promedio de $1,31 \text{ t ha}^{-1}$ en el período 2018-2022. En los próximos cinco años, se estima un incremento en la productividad del maíz amiláceo de 8,8 % anual, en tanto que, en los próximos seis años, se proyecta que la productividad del maíz amarillo duro, tendrá un incremento del 3,0 % anual. La semilla es uno de los componentes más importantes de la producción agrícola y sus costos de producción son un indicador del medio rural. La oferta es limitada en la región andina: las proyecciones son de un incremento en los próximos cinco años del 5,8 % anual. En la región Litoral, la oferta y la demanda de semilla está cubierta por la empresa privada y no existe déficit para este importante componente de la producción. Uno de los tipos de maíz que tendrá mayor demanda será el maíz negro por sus características de alto valor nutricional y las estimaciones de rentabilidad para la producción de semilla de calidad de este tipo de maíz, con una relación beneficio/costo de entre 1,58 y 1,70, las cuales son un indicador de que la producción de semilla de maíces amiláceos de color negro es rentable.

Palabras clave: maíz amiláceo, maíz duro, producción, productividad, región Litoral, región Andina, rentabilidad, semilla.

INTRODUCCIÓN

En Ecuador, la producción de maíz se localiza principalmente en las regiones Litoral y Andina con variaciones en la textura, el color del grano, sus niveles de producción y productividad. Se estima que la producción y rendimiento promedio en la región Litoral en el período 2018-2023 fue de 1 462 655,67 toneladas métricas (t) y de $4,17 \text{ t ha}^{-1}$, respectivamente. En la región Andina, para el período 2018-2022, los promedios fueron de una producción de 66,725.40 (t) y un rendimiento de $1,31 \text{ t ha}^{-1}$ [1,2]. En la región Litoral predomina el cultivo de maíces de textura vítrea y color amarillo, y en la Andina se observa una variación muy importante en texturas y colores, que van desde el amiláceo (amarillo, blanco y negro) al morocho (amarillo y blanco). Uno de los tipos de maíz amiláceo, que se producen en la región Andina, con los mejores componentes nutricionales es el maíz negro o morado, que proviene de la raza ecuatoriana denominada “racimo de uva” [3], cuyos componentes más importantes son los fenoles y las antocianinas, por lo que se lo considera un alimento funcional y nutracéutico [4,5,6].

La producción de maíces del tipo duro o vítreo está orientada a satisfacer la demanda de la agroindustria, ya que es un importante componente en la elaboración de alimentos balanceados para la producción de proteína animal, como carne, huevos y leche. Los maíces de textura amilácea son producidos para cubrir la demanda y consumo humano



de productos como choclo, granos o harina. En la última década, se ha priorizado el mejoramiento de maíces especiales, cuyas características abren la posibilidad de que los agricultores de la Sierra aumenten sus ingresos mediante la siembra de estos nuevos cultivares, que ofrecen mayor rendimiento y precio debido a la creciente demanda nacional e internacional de maíces negros, destacados por sus altos contenidos nutricionales tanto en la mazorca como en la tusa o coronta [7,8].

Frente a este escenario positivo, el Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP) y la Universidad San Francisco de Quito (USFQ) han desarrollado, para la región altoandina del Ecuador, nuevas variedades de maíz negro denominadas INIAP-199, USFQ-1 y USFQ-2 [9,10], las cuales poseen buenas características agronómicas, alto rendimiento y altos niveles de antocianinas.

El proceso de obtención de semilla es de gran importancia para garantizar una mayor producción, productividad y rentabilidad. La semilla de maíz de nuevos cultivares mejorados es el medio por el cual se entrega al agricultor todo el potencial genético de una variedad o híbrido. A través de este importante insumo, se garantiza la pureza varietal, el potencial de productividad, la resistencia a plagas y enfermedades, la precocidad, la calidad del grano y la tolerancia a las condiciones adversas del suelo y el clima. En la región altoandina ecuatoriana, existe un déficit de semilla de calidad de maíces amiláceos. Si se considera que para sembrar una hectárea se requiere aproximadamente de 30 kilogramos (kg) de semilla, se estima que existe una demanda total de 1719 (t) de semilla para cubrir la superficie sembrada de maíz amiláceo para grano y choclo [11].

En cuanto a la oferta de semilla de calidad para la región Litoral, el sector privado provee entre el 93 % al 97 % con híbridos de alto rendimiento, para lo cual se requiere de una cantidad promedio de semilla por hectárea de 17 kg [12].

Los costos de producción son importantes para determinar la rentabilidad del cultivo y varían de acuerdo con la variedad, la tecnología utilizada y la categoría de semilla [13]. Conocer los costos de producción constituye un elemento básico para determinar si el negocio agrícola es, o no, conveniente desde el punto de vista económico y es una herramienta indispensable para los productores en la toma de decisiones y en la planificación administrativa [14].

El objetivo del presente estudio fue estimar la eficiencia de la producción y productividad del maíz, así como la producción de semilla en las dos regiones geográficas más importantes del Ecuador. Para realizar estas estimaciones, se utilizó un análisis de regresión simple ($p \leq 0.05$), considerando como variables independientes los ciclos anuales del cultivo y como variables dependientes la producción, la productividad del grano y la semilla.

OFERTA, DEMANDA Y PRECIO DEL GRANO DE MAÍZ EN EL ECUADOR

Maíz amiláceo o suave

El maíz amiláceo o suave es cultivado en la región altoandina del Ecuador. Las provincias que más producen son Chimborazo y Bolívar, cuyo rendimiento está orientado



básicamente al consumo humano. La producción de maíz amiláceo disminuyó de 65 849 hectáreas (ha) en 2018 a 50 376 ha en 2022. Esta reducción en el área sembrada fue compensada con los incrementos en la producción, que pasó de 50 055 toneladas métricas (t) a 83 852 (t) en el mismo periodo [1].

A partir del comportamiento del área sembrada y la producción, se estimaron los incrementos en el mismo periodo mediante un análisis estadístico de regresión [15]. Con base en este análisis, se estimó que debería haber un incremento del 6 %, con un promedio anual de 1,2 % hasta llegar a una producción estimada para el año 2027 de 74 169,12 (t) de maíz amarillo amiláceo (Gráfico 1).

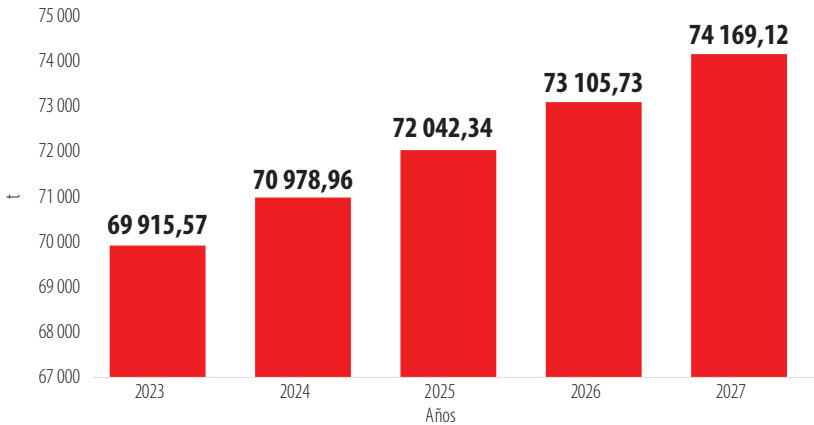


Gráfico 1. Producción estimada de maíz amarillo amiláceo en grano seco en el Ecuador para el periodo 2023-2027.
Fuente: Elaboración propia

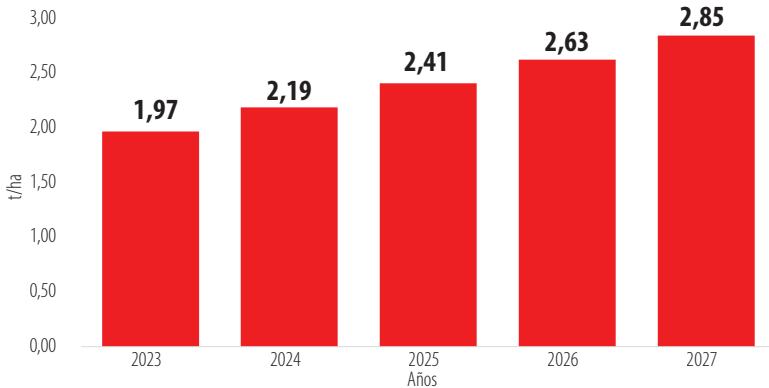


Gráfico 2. Productividad estimada del maíz amarillo amiláceo en grano seco en el Ecuador para el periodo 2023-2027.
Fuente: Elaboración propia



Maíz amarillo duro

La productividad o rendimiento del maíz amarillo amiláceo en grano seco experimentó un incremento significativo durante el periodo 2018 a 2022, que varió de 0,84 toneladas por hectárea ($t\ ha^{-1}$) a $1,66\ t\ ha^{-1}$, con un promedio de $1,31\ t\ ha^{-1}$. Con base en esta información, se estimó la productividad esperada para el periodo 2023-2027, proyectándose entre $1,97\ t\ ha^{-1}$ y $2,85\ t\ ha^{-1}$, con un incremento estimado anual de 8,8 % (Gráfico 2).

La producción de maíz amarillo duro estimada por el Ministerio de Agricultura y Ganadería para el periodo 2018-2023 varió entre 1,32 y 1,40 millones de toneladas métricas (t), siendo el año de mayor producción 2022, con un valor 1,64 millones de (t) y un promedio para el periodo indicado de 1,47 (t). Las proyecciones para los próximos seis años indican que la producción incrementará en un 3 % anual, con una variación entre 1,67 a 1,99 (t) para el periodo 2024-2029 y un promedio de 1,82 (t). Este escenario positivo permitirá cubrir las necesidades del país y disminuir el volumen de las importaciones (Gráfico 3).

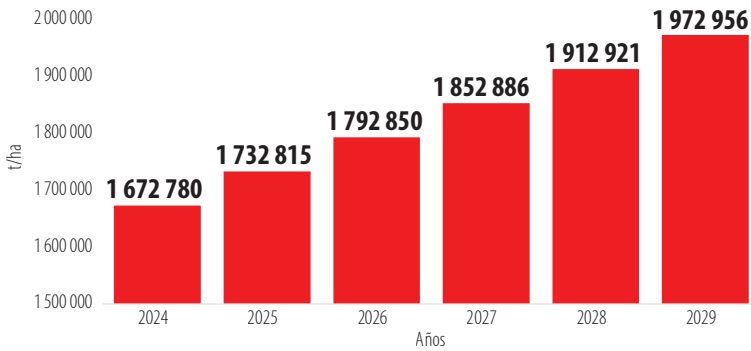


Gráfico 3. Producción estimada de maíz amarillo duro en el Ecuador para el periodo 2024-2029.
Fuente: Elaboración propia

La productividad o rendimiento de este tipo de maíz también ha tenido una importante variación, de entre $3,62\ t\ ha^{-1}$ en el 2018 a $4,36\ t\ ha^{-1}$ en el 2023, con un promedio en este período de $4,17\ t\ ha^{-1}$. Las estimaciones de incremento en la productividad para los próximos seis años indican un incremento anual del 2,97 % y un total de 17,82 % para este período, con valores de entre $4,77\ t\ ha^{-1}$ en 2024 a $5,62\ t\ ha^{-1}$ en 2029, y un promedio de $5,19\ t\ ha^{-1}$. Estas proyecciones podrían obtenerse utilizando nuevos híbridos con alto potencial de rendimiento, así como mejores y más eficientes métodos de manejo del cultivo (Gráfico 4).

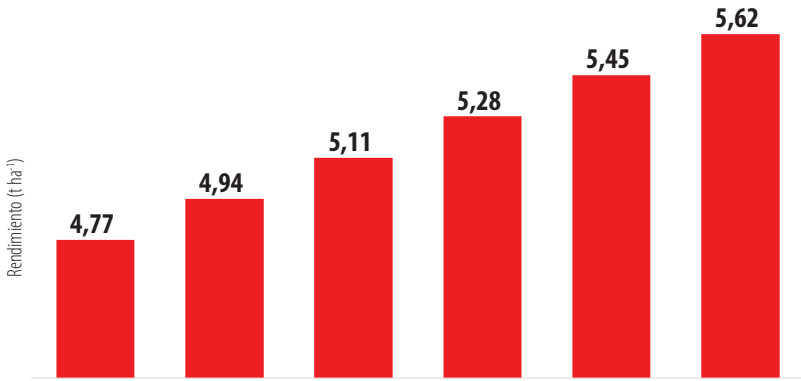


Gráfico 4. Productividad estimada de maíz amarillo duro en el Ecuador para el periodo 2024-2029.

Fuente: Elaboración propia

Uno de los factores que también han incidido en los incrementos en la producción y productividad del maíz amarillo duro es el precio de sustentación, acordado entre todos los actores de la producción y la agroindustria a través del Consejo Consultivo de la cadena de valor del maíz amarillo duro [16]. Los precios en dólares por quintal (q), con 13 % de humedad y 1 % de impurezas, variaron entre US\$ 14,36 y US\$ 16,50, en el período 2018-2024. Para los próximos siete años, se estima que los precios fluctuarán entre US\$ 16,69 y US\$ 18,73, con un incremento promedio anual del 1,74 % (Gráfico 5).

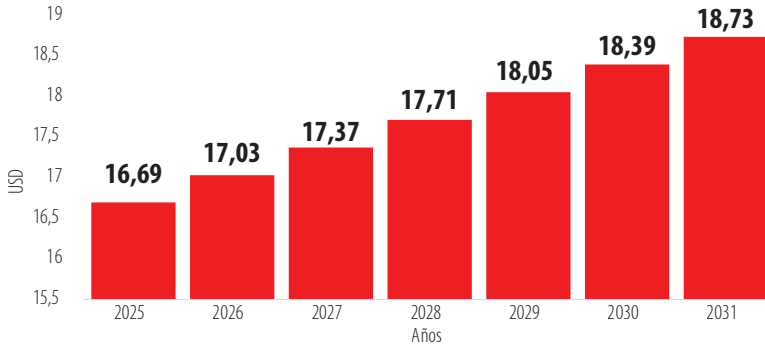


Gráfico 5. Precios estimados por quintal de maíz amarillo duro en el Ecuador para el periodo 2025-2031.

Fuente: Elaboración propia

DEMANDA DE GRANO DE MAÍZ AMILÁCEO Y DURO

La producción de maíz amiláceo o suave está localizada principalmente en las provincias de Bolívar, Chimborazo, y Cotopaxi, las cuales aportan aproximadamente el 82 % del total de la producción [17]. Si se considera como año de referencia el 2022, en el cual la producción fue de 83 532 (t) y las importaciones de 184 (t), se estima un Consumo Nacional Aparente (CNA) de 84 036 (t), un consumo per cápita anual de 10 kg [18], y un precio promedio por quintal de US \$20,07 para choclo y US \$102,26 para grano, considerando los tres principales centros de consumo: Cuenca, Quito y Guayaquil [1].



Uno de los tipos de maíz amiláceo es el maíz negro, el cual aún no es un producto de consumo masivo en Ecuador [1]. Sin embargo, el creciente interés por alimentos saludables podría impulsar su demanda en mercados emergentes para productos derivados del maíz negro, como harinas, bebidas tradicionales (chicha), vino y snacks, así como materia prima para extracción de compuestos fenólicos antioxidantes. Además, existe un nicho de mercado en tiendas de productos orgánicos, ferias que promueven la biodiversidad y restaurantes gourmet.

Las provincias con mayor producción de maíz amarillo duro son Los Ríos y Manabí, que aportan con el 73 % del total de la producción nacional, orientada a satisfacer las necesidades de la agroindustria. Se estima que la demanda anual de maíz amarillo duro es de 1,46 (t), la cual es cubierta entre un 85 % a un 90 % por la producción nacional. Sin embargo, esta producción no cubrió la demanda total, por lo que se importaron 174 394 (t) y 91 550 (t) en los años 2022 y 2023, respectivamente [16,19].

El principal componente en la fórmula nutricional para la producción de alimentos balanceados es el maíz amarillo duro (60 %). Se estimó que, en el año 2023, la producción de alimentos balanceados en el país fue de 5,5 millones de t; de las cuales el 54 % se utilizó en la avicultura y la porcicultura, el 41% en camaronicultura, el 3% en la ganadería y el 2 % en las mascotas. El consumo promedio de carne de pollo fue de 30 kg por persona al año [20-21].

PRODUCCIÓN ESTIMADA DE SEMILLA DE MAÍZ AMILÁCEO Y DURO EN EL ECUADOR 2024-2028

Las semillas constituyen uno de los componentes más importantes de la producción agrícola y requieren controles de calidad eficientes que garanticen un producto, ya sea variedad o híbrido, con los mejores estándares relacionados con sus componentes genéticos, físicos, fisiológicos y sanitarios. La tecnología de semillas requiere que este insumo, en la producción de variedades mejoradas o nativas y de híbridos, tenga atributos de calidad y sea manejado en condiciones favorables en el campo, el almacenamiento y la conservación [11]. Se estima que el 91 % de los agricultores en la Sierra utilizan semilla seleccionada de grano comercial, un 7 % mejorada y un 2% reciclada [2].

La oferta de semillas de variedades para la Sierra es limitada y su demanda está cubierta parcialmente por el INIAP en sus categorías básica y certificada, tanto de materiales amiláceos como morochos. En el periodo 2018-2023 se produjeron un total de 27,37 (t) de semilla de variedades amiláceas de categoría básica, con un promedio anual de 4,56 (t) [22]. La proyección para los cinco años de semilla de categoría básica de variedades mejoradas de maíz amiláceo estima un incremento de 9,35 (t) en 2024 a 12,10 (t) en 2028, con un incremento anual del 5,8 %, lo que permitirá aumentar los niveles de cobertura con semilla de calidad y una mayor disponibilidad para los productores de la Sierra (Gráfico 6).

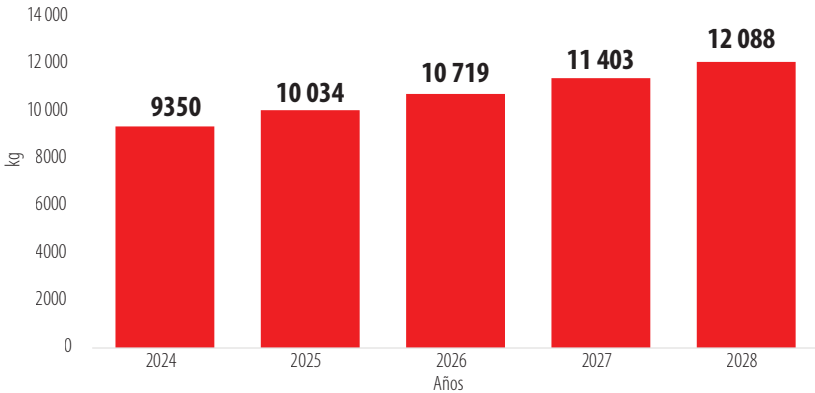


Gráfico 6. Producción estimada de semilla de maíz amiláceo en el Ecuador en el periodo 2024-2028.

Fuente: Elaboración propia

La oferta de semilla de híbridos simples de maíz amarillo duro para la región litoral está cubierta por diferentes empresas del sector privado, para responder a la demanda de los productores de la zona tropical. Se estima que los agricultores utilizan semilla de diferentes categorías que se comercializan y distribuyen de la siguiente manera: 60 % certificada, 20 % mejorada, 1 % común y 19 % reciclada. Se ha estimado que la demanda de semilla de la categoría certificada para el periodo 2023-2024 fue de 3315 (t) con una cobertura estimada en 195 000 hectáreas [16,23].

Estimación de costos de producción de semilla de calidad de maíz amiláceo negro para la sierra del Ecuador

Los costos de producción son uno de los principales indicadores del desempeño de un predio rural y representan el valor de los recursos utilizados para producir determinados volúmenes de producción agrícola. Conocer este indicador es fundamental para la planificación, gestión y toma de decisiones de los productores rurales [24].

Con base en la información generada en el proyecto: “Producción de semilla de calidad en dos variedades de maíz negro (USFQ1- USFQ 2), en dos ambientes en la provincia de Imbabura y Pichincha” [25], se estimaron los costos y la rentabilidad de la producción de semilla. La superficie estimada para estas localidades fue de 1 400 metros cuadrados en Lumbisí y 1 500 metros cuadrados en Cotacachi.

Para Lumbisí, las estimaciones de los componentes de mayor costo, expresados en porcentaje del costo total, fueron las labores culturales del manejo del cultivo (27,82 %) y cosecha, postcosecha y venta (40,12 %), con un rendimiento estimado de semilla de 1 143 kg y una relación beneficio/costo de 1,58; un valor actual neto de US\$ 1 175,20; una tasa interna de retorno 11%; el retorno sobre la inversión de 1,5 veces; y un punto de equilibrio de US\$ 638 (Gráfico 7).

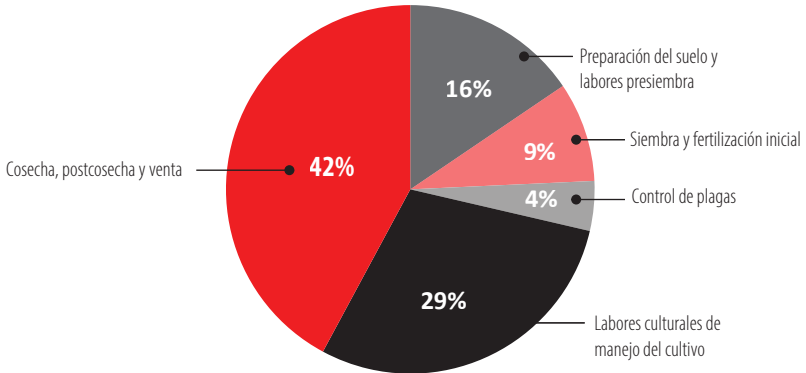


Gráfico 7. Componentes del costo de producción de semilla de maíz amiláceo negro en Lumbisí, provincia de Pichincha, Ecuador, 2024.

Fuente: Elaboración propia

Para Cotacachi, asimismo, los componentes de mayor costo en relación con el costo total fueron las labores culturales del manejo del cultivo (22,28 %) y la cosecha, postcosecha y venta (45,78 %), con una productividad estimada de semilla de 894,44 kg. Además, se obtuvo una relación beneficio/costo de 1,70; un valor actual neto de US\$ 1023,10; una tasa interna de retorno del 11,2 %; un retorno sobre la inversión 1,6 veces; y un punto de equilibrio US\$ 471. Estas estimaciones permiten concluir que la producción de semilla de calidad de maíces amiláceos de grano negro es rentable (gráfico 8).

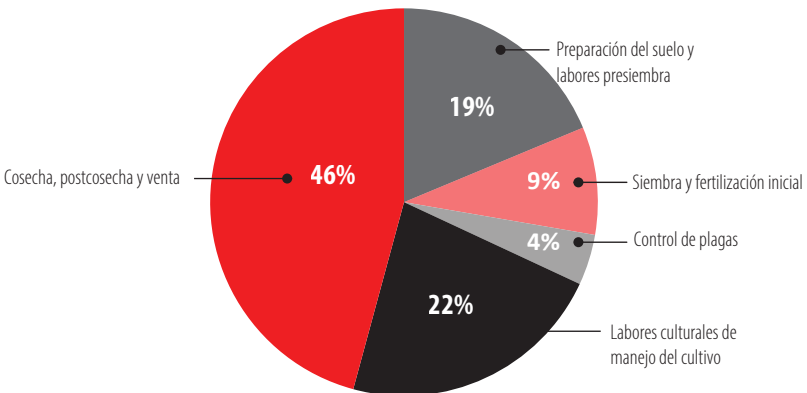


Gráfico 8. Componentes del costo de producción de semilla de maíz amiláceo negro en Cotacachi, provincia de Imbabura, Ecuador, 2024.

Fuente: Elaboración propia

CONCLUSIONES

Las estimaciones y proyecciones para los próximos cinco a seis años de los dos tipos de maíz de mayor superficie sembrada en el Ecuador indican incrementos importantes en



la oferta de grano, con rendimientos superiores a las 5 t ha⁻¹ mediante la utilización de tecnologías más eficientes. Esto permitiría una disminución en las importaciones de este cereal de hasta un 15 %, una mayor rentabilidad del cultivo y un impacto significativo en la seguridad alimentaria del país.

La producción de semilla de calidad de maíces amiláceos de color negro representará un aporte crucial para el incremento esperado en las áreas sembradas, estimado en un rango de entre un 5 % y un 10 %, mejorando los contenidos nutricionales del grano, proporcionando un mayor valor agregado como insumo para la agroindustria y aumentando la rentabilidad en la producción de estos tipos especiales de maíz.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad San Francisco de Quito USFQ por el financiamiento para la generación de la información del proceso de producción y costos de semilla a través del proyecto “Producción de semilla de calidad en dos variedades de maíz negro (USFQ 1, USFQ 2) en dos ambientes en las provincias de Pichincha e Imbabura” Poligrant 2024 del Colegio de Ciencias e Ingeniería.

CONFLICTOS DE INTERÉS

Los autores declaran que no existe conflicto de interés.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Mario Caviedes contribuyó con la idea, realizó la tabulación, el análisis y la interpretación crítica de los datos, y escribió el artículo. Francisco Carvajal contribuyó con la idea, realizó la tabulación y el análisis e interpretación de los datos y escribió el artículo. José Velásquez contribuyó con la idea, la tabulación de los datos y escribió el artículo. María Gabriela Albán contribuyó con la idea, realizó la tabulación de los datos, y escribió el artículo.

REFERENCIAS

- [1] Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG). (2022). *Sistema de Información Pública Agropecuaria: Cifras Agroproductivas*. <https://sipa.agricultura.gob.ec>
- [2] Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC). (2023). *Encuesta de superficie y producción agropecuaria continua (ESPAC)*. <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/estadisticas>
- [3] Yáñez, G., Zambrano Mendoza, J. L., Caicedo, M., Sánchez Arizo, V. H. y Heredia, J. (2003). *Catálogo de recursos genéticos de maíces de altura ecuatorianos*. INIAP, Estación Experimental Santa Catalina, Programa de Maíz. <http://repositorio.iniap.gob.ec/jspui/handle/41000/43>
- [4] Zambrano, J. L., Velásquez, J., Peñaherrera, D., Sanjoquiza, C., Cartagena, Y., Villacrés, E., Garcés, S., Ortíz, R., León, J., Campaña, D., López, V., Asaquibay, C., Nieto, M., Sanmartín, G., Pintado, P., Yáñez, C. y Racines, M. (2021). *Guía para la producción sustentable de maíz en la Sierra Ecuatoriana*. INIAP, Manual No. 122. <http://repositorio.iniap.gob.ec/handle/41000/5796>
- [5] Caviedes, M., & Albán, G. (2020). Memorias del primer Simposio de Genética y Genómica en el Ecuador. *Archivos Académicos USFQ*, (25), 42-42. <https://revistas.usfq.edu.ec/index.php/archivosacademicos/article/view/1654>
- [6] Albán, M. G., Zambrano, J. L., Caviedes, M., & Carvajal, F. (2023). II Simposio Ecuatoriano del Maíz: Ciencia, Tecnología e Innovación. *Archivos Académicos USFQ*, (49), 1-67. <https://revistas.usfq.edu.ec/index.php/archivosacademicos/article/view/3109>
- [7] Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI). (2019). *Oficina de Información Agraria: Estadística Agraria Mensual*. <https://siea.midagri.gob.pe/portal/publicaciones/informacion-estadistica>
- [8] Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego, Instituto Nacional de Innovación Agraria – Dirección de Desarrollo Tecnológico Agrario. (2022). *Guía de manejo del cultivo de maíz morado (Zea mays L.)*. <https://repositorio.inia.gob.pe/items/b608a8dd-6b74-4ce9-bb69-ab9027b99927>
- [9] Yáñez, G., Zambrano Mendoza, J. L., Caicedo, M., Heredia, J., Sangoquiza Caiza, C. A., Villacrés, E., Racines Jaramillo, M. R. y Caballero, D. (2016). *Ficha técnica de la variedad de maíz negro INIAP-199 "Racimo de Uva"*. <https://repositorio.iniap.gob.ec/handle/41000/3166>
- [10] Dávalos, V. (2023). *Evaluación de nueve características agronómicas en dos variedades de maíz morado (Zea mays L.) en Tumbaco, Pichincha* (Tesis de Ingeniería en Agronomía). Universidad San Francisco de Quito USFQ. <https://revistas.usfq.edu.ec/index.php/avances/article/view/143>
- [11] Vásquez, J., Araujo, M. y Zambrano, J. L. (2024). *Tecnologías para el mantenimiento y multiplicación de semilla de variedades de polinización libre de maíz*. INIAP. <https://repositorio.iniap.gob.ec/handle/41000/6154>
- [12] Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC). (2020-2023). *Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua (ESPAC)*. <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/estadisticas>
- [13] Medina, A. (2022). *Guía de manejo del cultivo de maíz morado (Zea mays L.)*. Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA). <https://repositorio.inia.gob.pe/items/b608a8dd-6b74-4ce9-bb69-ab9027b99927>
- [14] Carrillo, R., Carvajal, T., Valarezo, O., Cañarte, E., Mendoza, A., Mendoza, H., Hinojosa, F., Motato, N., Moreira, P. & Ponce, J. (2014). *Manual de buenas prácticas agrícolas y estimación de costos de producción para cultivos de ciclo corto en Manabí*. INIAP. <https://repositorio.iniap.gob.ec/handle/41000/1294>
- [15] Corral D., L. (2019). *Estadística y técnicas experimentales para la investigación biológica*. Universidad Politécnica Salesiana (UPS). <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/19040/1/Estad%C3%ADsticas%20y%20t%C3%A9cnicas%20experimentales.pdf>
- [16] Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG). (2023). *Sistema de Información Pública Agropecuaria: Cifras agroproductivas*. <https://sipa.agricultura.gob.ec/index.php/cifras-agroproductivas>
- [17] Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG). (2021). *Sistema de Información Pública Agropecuaria: Cifras agroproductivas*. <http://sipa.agricultura.gob.ec/index.php/cifras-agroproductivas>
- [18] Baca-Urbina, G. (2010). *Evaluación de proyectos (6ª ed.)*. McGraw-Hill/Interamericana Editores, S.A. de C.V. 318 pp.



- [19] Corporación Financiera Nacional (CFN). (2023). *Ficha sectorial: Cultivo de maíz*. Subgerencia de Análisis de Bienes y Servicios. <https://www.cfn.fin.ec>
- [20] Asociación de Productores de Alimentos Balanceados del Ecuador (APROBAL). (2023, junio). La industria de alimentos balanceados tuvo un crecimiento del 10% en 2023 y se espera aumentar el índice en 2024. <https://aprobal.com/la-industria-de-alimentos-balanceados-tuvo-un-crecimiento-del-10-en-2023-y-se-espera-aumentar-el-indice-en-2024/>
- [21] Corporación Nacional de Avicultores del Ecuador (CONAVE). (2023, junio). <https://conave.org>
- [22] Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias de Ecuador (INIAP). (2023). *Programa de semillas. Estación Santa Catalina*.
- [23] Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC). (2024). *Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua (ESPAC)*. <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/estadisticas>
- [24] Borja, M. J., & Caviedes, M. (2013). Evaluación de dos ciclos de producción de semilla en dos variedades de maíz morado (*Zea mays* L.) en Tumbaco-Pichincha. *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías*, 5(2). <https://doi.org/10.18272/aci.v5i2.143>
- [25] Caviedes, M., Albán, M. G., & Gangotena, D. (2024). *Producción de semilla de calidad en dos variedades de maíz negro (USFQ 1, USFQ 2) en dos ambientes en las provincias de Pichincha e Imbabura*. Proyecto de investigación del Colegio de Ciencias e Ingenierías de la Universidad San Francisco de Quito USFQ.

Caracterización mecánica de un material compuesto de resina poliéster reforzado con corteza de Eucalipto

Jimmy David García Quiroz^{1*}, Byron Darío Analuiza Hidalgo¹, Wilson Gabriel Agualongo Amangandi¹, Milton Xavier Remache Sasig¹

¹Instituto Superior Tecnológico el Libertador, Mecánica Automotriz, Mecánica de materiales,

*Autor para correspondencia/Corresponding author: jgarcia@stel.edu.ec

Mechanical characterization of a material composed of polyester resin reinforced with Eucalyptus bark

Resumen

Este estudio tiene como objetivo evaluar el desempeño mecánico de un material compuesto fabricado con diferentes proporciones de matriz de resina poliéster y refuerzo de fibra de corteza de eucalipto. Se prepararon probetas con fracciones volumétricas de 90 % matriz - 10 % refuerzo, 80 % matriz - 20 % refuerzo y 70 % matriz - 30 % refuerzo, con las fibras distribuidas aleatoriamente. Se realizaron ensayos de tracción, flexión e impacto según las normas ASTM para determinar las propiedades mecánicas del compuesto. Los resultados mostraron una disminución en la resistencia a la tracción y flexión del compuesto en comparación con la resina pura, lo cual se atribuyó a la presencia de concentradores de esfuerzos y a una baja adhesión entre las fibras y la matriz. Sin embargo, se observó un aumento en el módulo elástico y en la energía de impacto absorbida por el material compuesto. La combinación de 70 % de matriz y 30 % de refuerzo presentó el mejor balance de propiedades mecánicas entre las diferentes formulaciones estudiadas. Este estudio destaca el potencial de los materiales compuestos reforzados con fibras naturales como una alternativa sostenible a las fibras sintéticas, aprovechando los recursos renovables disponibles en Ecuador y reduciendo el impacto ambiental asociado a la producción de materiales compuestos tradicionales. Los resultados obtenidos contribuyen al desarrollo de nuevos materiales ecológicos con aplicaciones en diversas industrias, promoviendo el uso de fibras naturales y fomentando la investigación en este campo.

Palabras clave: Caracterización de compuestos, refuerzo de fibra natural, ensayos mecánicos, materiales sostenibles, recursos renovables, compuestos ecológicos, matriz de poliéster, fibra de eucalipto, normas ASTM, compuestos verdes.

Abstract

This study aims to evaluate the mechanical performance of a composite material manufactured with different proportions of polyester resin matrix and eucalyptus bark fiber reinforcement. Specimens were prepared with volumetric fractions of 90 % matrix - 10% reinforcement, 80 % matrix - 20 % reinforcement, and 70 % matrix - 30 % reinforcement, with randomly distributed fibers. Tensile, flexural, and impact tests were conducted according to ASTM standards to determine the mechanical properties of the composite. The results showed a decrease in the tensile and flexural strength of the composite compared to the pure resin, which was attributed to the presence of stress concentrators and low adhesion between the fibers and the matrix. However, an increase in the elastic modulus and impact energy absorbed by the composite material was



Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /
Edited by:
Sebastián Ponce

Recibido /
Received:
10/06/2024

Aceptado /
Accepted:
29/07/2024

Publicado en línea /
Published online:
04/09/2024



observed. The combination of 70 % matrix and 30 % reinforcement presented the best balance of mechanical properties among the different formulations studied. This study highlights the potential of natural fiber-reinforced composite materials as a sustainable alternative to synthetic fibers, taking advantage of the renewable resources available in Ecuador and reducing the environmental impact associated with the production of traditional composite materials. The obtained results contribute to the development of new ecological materials with applications in various industries, promoting the use of natural fibers and encouraging research in this field.

Keywords: Composite characterization, natural fiber reinforcement, mechanical testing, sustainable materials, renewable resources, eco-friendly composites, polyester matrix, eucalyptus fiber, ASTM standards, green composites.

INTRODUCCIÓN

Los materiales compuestos son una combinación de dos o más constituyentes con propiedades físicas o químicas distintas, que al unirse dan lugar a un nuevo material con características superiores y una alta relación resistencia-peso alta [1,2]. Un ejemplo de material compuesto natural es la madera, constituida por fibras de celulosa embebidas en una matriz de lignina, un polímero orgánico. Asimismo, los tejidos óseos están formados por cristales inorgánicos de hidroxiapatita dispersos en una matriz de colágeno, una proteína fibrosa [3].

En general, los materiales compuestos constan de una matriz continua, que puede ser orgánica o inorgánica, y un refuerzo disperso en forma de partículas, fibras o láminas. La zona de contacto entre la matriz y el refuerzo se denomina interfaz, y su función es garantizar una adecuada adhesión entre ambas fases. Una interfaz débil o deficiente puede resultar en una baja resistencia del compuesto, ya que la transferencia de carga de la matriz al refuerzo no se produce de manera eficiente correctamente [4,5]. La matriz desempeña diversas funciones, como proteger al refuerzo de la abrasión mecánica y las condiciones ambientales adversas, mantener la orientación del refuerzo y proporcionarle cohesión.

Por su parte, el refuerzo aporta resistencia y rigidez al compuesto, contribuyendo a soportar las cargas estructurales. El comportamiento mecánico de los materiales compuestos depende de diversos factores, como las dimensiones y orientación del refuerzo, las técnicas de fabricación empleadas y la fracción volumétrica de matriz y refuerzo [6,7]. Una estrategia común para mejorar las propiedades de los polímeros y reducir sus costos es la incorporación de rellenos, que pueden clasificarse en cargas y refuerzos. Las cargas tienen como objetivo principal abaratar el producto final al disminuir la cantidad de resina necesaria, mientras que los refuerzos se utilizan para aumentar la rigidez y resistencia mecánica de la matriz polimérica [8].

Debido a la baja resistencia intrínseca de los polímeros, se ha recurrido al uso de fibra de vidrio como refuerzo. Sin embargo, este tipo de fibra sintética presenta limitaciones, como su carácter no biodegradable y su elevado costo [9,10]. En los últimos años, se ha intensificado la búsqueda de alternativas basadas en fibras naturales para reemplazar a la



fibra de vidrio. Desde la década de 1990, las fibras naturales han ido ganando terreno como refuerzo en materiales compuestos, atrayendo la atención de la industria y la comunidad científica debido a sus ventajas en términos de sostenibilidad y desempeño [11,12].

Llanes et al. [13] investigaron un material compuesto constituido por una matriz de resina fotopolimérica y refuerzos de fibras naturales de abacá y cabuya, fabricado mediante tecnología de impresión 3D, con el objetivo de evaluar su potencial aplicación en la manufactura de componentes automotrices. Los compuestos fueron elaborados incorporando un 20 % en volumen de cada tipo de fibra y sometidos a ensayos de flexión según el estándar ASTM 790. Los resultados de la caracterización mecánica revelaron una disminución en la resistencia máxima a flexión de los compuestos reforzados con fibras de abacá (77.53 MPa) y cabuya (83.26 MPa) en comparación con la matriz pura (92.77 MPa). Por otro lado, el módulo elástico en flexión se vio incrementado en los compuestos con abacá (2211.33 MPa) y cabuya (1806.03 MPa) respecto al polímero base (1689.64 MPa), evidenciando un aumento en la rigidez de los materiales desarrollados.

Sajin et al. [14] estudiaron el efecto de la longitud de las fibras cortas de yute (5 mm) y el contenido de refuerzo (30 % en volumen) en las propiedades mecánicas de compuestos de matriz poliéster sometidos a ensayos de tracción, flexión e impacto. Los resultados mostraron valores de resistencia en el rango de 20.3 a 72.8 MPa, 21.5 a 64.66 MPa y 0.39 a 0.61 J para los ensayos de tracción, flexión e impacto, respectivamente. Además, se llevó a cabo un análisis de la superficie de fractura de los materiales compuestos mediante microscopía electrónica de barrido (SEM). Los autores concluyeron que las propiedades mecánicas específicas de la fibra natural de yute y su compatibilidad con la matriz polimérica son consideradas excelentes.

Umanath, K et al. [15] exploraron el desarrollo de materiales compuestos híbridos reforzados con fibras de hoja de piña y fibra de carbono para su aplicación en la fabricación de ballestas de suspensión automotriz. Los resultados demostraron una reducción de peso del 75 % en comparación con las ballestas de acero convencionales, lo cual se traduce en mejoras en el consumo de combustible y menores costos de producción de los vehículos. Se realizó una comparativa entre las ballestas reforzadas con fibra de vidrio y aquellas fabricadas con el compuesto híbrido, evaluando su resistencia a la compresión, resistencia al impacto y dureza Brinell. Los hallazgos revelaron que las ballestas elaboradas con el compuesto de fibra de carbono y fibra de hoja de piña presentan menor peso y mayor resistencia en comparación con las de fibra de vidrio-epoxi.

Getu, D et al. [16] investigaron las propiedades de la fibra de sisal extraída manualmente de hojas recolectadas en las tierras altas de Etiopía. Con el fin de eliminar impurezas y mejorar la rugosidad superficial, las fibras fueron tratadas mediante inmersión en una solución de hidróxido de sodio durante 24 horas. Los compuestos reforzados con fibra de sisal resultan atractivos debido a su elevada resistencia, bajo peso y biodegradabilidad, convirtiéndolos en una excelente alternativa para aplicaciones en paneles de carrocería de vehículos. Se evaluó el efecto de la orientación de las fibras (0°, 45° y 90°) en las propiedades mecánicas de los compuestos bajo condiciones de tracción, flexión e impacto. Los resultados experimentales demostraron que la variación en la orientación de las fibras permite mejorar el desempeño mecánico de los materiales compuestos desarrollados.



Barbosa et al. [17] evaluaron la tenacidad mediante ensayos Charpy de compuestos de matriz poliéster reforzados con fibras largas y continuas de corteza de eucalipto, alineadas longitudinalmente. Se investigaron formulaciones con distintos contenidos de refuerzo (0, 10, 20 y 30 % en peso). Los resultados revelaron un incremento en la tenacidad del material al aumentar la proporción de fibras, obteniéndose el valor más elevado de resistencia al impacto (251.1 ± 24.3 J/m) para el compuesto con 30 % en peso de refuerzo. Adicionalmente, se realizó una inspección macroscópica de las probetas ensayadas y un análisis fractográfico mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), identificándose un modo de falla por fractura en la interfaz fibra-matriz, lo cual se considera deseable en este tipo de materiales compuestos.

Sartor et al. [18] desarrollaron un material compuesto de polipropileno (PP) reforzado con corteza de eucalipto con el objetivo de determinar sus propiedades mecánicas. Se prepararon tres formulaciones distintas: la primera consistió en PP con un 20 % de corteza de eucalipto, 5 % de látex y 2 % de anhídrido maleico; la segunda contenía PP con 20 % de corteza de eucalipto, 2 % de PP-MAH y 0 % de látex; mientras que la tercera estaba compuesta únicamente por PP. Se llevaron a cabo ensayos de resistencia a la tracción, flexión e impacto.

El diseño experimental empleado fue completamente aleatorio y los datos obtenidos se sometieron a un análisis de varianza. Las medias fueron comparadas mediante la prueba de Tukey con un nivel de significancia del 5 %, utilizando el software Sisvar, tomando como referencia el PP puro. Los resultados mostraron una disminución en las propiedades mecánicas a tracción, flexión e impacto de los compuestos en comparación con el PP sin refuerzo.

De Oliveira et al. [19] realizaron un estudio comparativo de la resistencia a tracción de compuestos de matriz poliéster y epoxi reforzados con fibras de eucalipto de 9 cm de longitud, considerando fracciones volumétricas de refuerzo del 30, 40 y 50 %. Los materiales fueron fabricados mediante moldeo por compresión aplicando una carga de 3 MPa con la ayuda de un molde de acero. Los ensayos de tracción revelaron que la resistencia a la tensión de los compuestos con matriz epoxi no presentó cambios significativos, mientras que en aquellos con matriz de poliéster se observó una ligera disminución.

Por otro lado, el módulo elástico se vio incrementado en ambos casos, siendo este aumento más notable en los compuestos con matriz epoxi, alcanzando valores hasta un 50 % superiores a los de la matriz pura. Adicionalmente, mediante un análisis SEM se evidenció una falta de adherencia en la interfaz fibra-matriz, atribuida al carácter hidrofóbico de la matriz y la presencia de humedad en las fibras. Los autores sugieren la aplicación de tratamientos químicos para mejorar la adhesión interfacial y así potenciar las propiedades mecánicas de los compuestos.

De Oliveira et al. [20] estudiaron el comportamiento a tracción de compuestos de matriz epoxi reforzados con distintas fracciones volumétricas de fibras de eucalipto (0, 30, 40 y 50 %). Las muestras fueron fabricadas vertiendo la resina en estado líquido en un molde y colocando las fibras sobre ella. Los resultados obtenidos mostraron una disminución de la resistencia a la tracción al incrementar el contenido de refuerzo, lo cual fue atribuido a una baja adherencia entre las fibras y la matriz. Los valores de resistencia máxima a la tracción registrados fueron de 27.72, 24.67, 23.72 y 14.67 MPa para las fracciones volumétricas de fibra de 0, 30, 40 y 50 %, respectivamente.



Este estudio tiene como propósito evaluar el desempeño mecánico de un material compuesto fabricado con diferentes proporciones de matriz y refuerzo, específicamente 90 % matriz - 10 % refuerzo, 80 % matriz - 20 % refuerzo y 70 % matriz - 30 % refuerzo, donde las fibras se distribuyen aleatoriamente en la matriz. Se emplearán los procedimientos descritos en las normas ASTM para llevar a cabo ensayos de tracción, flexión e impacto que permitan determinar las propiedades mecánicas del compuesto.

Además, se busca identificar la combinación de matriz y refuerzo que ofrezca el mejor balance de propiedades mediante un análisis comparativo de los resultados obtenidos. Finalmente, se contrastarán las propiedades mecánicas del material compuesto con las de un material de referencia constituido únicamente por resina, con el fin de evaluar el efecto de la incorporación del refuerzo en el desempeño del compuesto.

MATERIALES Y MÉTODOS

La Tabla 1 presenta las distintas fracciones volumétricas de matriz (M) y refuerzo (R) empleadas en la fabricación de las muestras para los ensayos de tracción, flexión e impacto. Como matriz se utilizó una resina poliéster, mientras que como refuerzo se empleó corteza de eucalipto. Se prepararon 5 probetas para cada ensayo, siguiendo las recomendaciones de las normas ASTM correspondientes.

Tabla 1. Grupo de probetas.

Grupo	Fracción Volumétrica (%)	Tipo	Orientación	N.º de probetas
Grupo A				
1	100 % M / 0 % R	Sin fibra	NA	15
Tracción				
Grupo B				
1	90 % M / 10 % R	Mixta	Al azar	5
2	80 % M / 20 % R	Mixta	Al azar	5
3	70 % M / 30 % R	Mixta	Al azar	5
Flexión				
Grupo C				
1	90 % M / 10 % R	Mixta	Al azar	5
2	80 % M / 20 % R	Mixta	Al azar	5
3	70 % M / 20 % R	Mixta	Al azar	5
Impacto				
Grupo D				
1	90 % M / 10 % R	Mixta	Al azar	5
2	80 % M / 20 % R	Mixta	Al azar	5
3	70 % M / 30 % R	Mixta	Al azar	5
Total Probetas				60



Obtención y preparación de las fibras de corteza de eucalipto

La corteza de eucalipto (*Eucalyptus globulus*) se recolectó de árboles ubicados en un bosque de la Provincia Bolívar, Ecuador, durante la temporada seca (junio-agosto). Se aprovechó el desprendimiento natural de la corteza para minimizar el daño a los árboles.

El proceso de preparación de las fibras siguió estos pasos:

1. Limpieza inicial de las cortezas recolectadas.
2. Remojo en agua destilada a $23 \pm 2^\circ\text{C}$ durante 24 horas para ablandar y facilitar la separación de fibras.
3. Desfibrado mecánico mediante golpeo suave con un mazo de madera.
4. Corte manual de las fibras a una longitud uniforme de 5 cm.
5. Lavado con una solución de agua destilada y jabón neutro (pH 7.0) en proporción 10:1, realizando tres ciclos de 5 minutos cada uno.
6. Secado en una estufa de convección forzada marca Esco a $105 \pm 2^\circ\text{C}$ durante 8 horas.
7. Control de humedad utilizando un analizador Mettler Toledo HB43-S, asegurando un contenido de humedad inferior al 8 % en peso.

Fabricación de las probetas

El proceso de fabricación de las muestras se llevó a cabo mediante estratificación manual y moldeo por compresión, siguiendo estos pasos:

1. Preparación del molde: Aplicación de tres capas de agente desmoldante (cera de carnaúba).
2. Pesaje de componentes: Resina poliéster, catalizador (MEKP) y fibras de eucalipto.
3. Mezcla de la resina: Dilución con 10 % de estireno monómero, adición de 1 % de octoato de cobalto y 2.5 % de MEKP.
4. Disposición aleatoria de las fibras en el molde.
5. Vertido de la resina sobre las fibras, asegurando una impregnación uniforme.
6. Cierre del molde y aplicación de presión mediante una prensa hidráulica PHI-30.

Parámetros del proceso de moldeo por compresión:

- Presión aplicada: 3 MPa (30.59 kg/cm^2)



- Temperatura de moldeo: $80 \pm 2^{\circ}\text{C}$
 - Tiempo de aplicación de presión: 30 minutos
 - Velocidad de cierre del molde: 2 mm/s
 - Área de la cavidad del molde: 358 x 345 mm
7. Curado inicial: 30 minutos bajo presión y temperatura constantes.
 8. Desmoldeo después de 4 horas de enfriamiento a temperatura ambiente.
 9. Curado final a $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ y $55 \pm 5\%$ de humedad relativa durante 2 semanas.
 10. Corte de probetas mediante láser CNC según dimensiones especificadas en las normas ASTM.
 11. Acondicionamiento de las probetas a $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ y $50 \pm 5\%$ de humedad relativa durante 48 horas (ASTM D618).

Ensayos mecánicos

La Tabla 2 especifica las normas ASTM empleadas para los ensayos destructivos de tracción (ASTM D3039 M-17), flexión (ASTM D8264 M-15) e impacto (ASTM D5626 M-10).

Tabla 2. Ensayos de tracción, flexión e impacto [21,22,23].

Tipo de ensayo	Norma	Dimensión de la probeta (Largo, ancho y espesor) mm	Máquina de ensayo
Tracción	ASTM D3039 M-17	250*25*5	Máquina universal de ensayos Tinius Olsen H25KS; capacidad máxima 25 kN.
Flexión	ASTM D7264 M-15	160*16*5	Máquina universal de ensayos Tinius Olsen H25KS; capacidad máxima 25 kN.
Impacto	ASTM D5628 M-10	58*58*5	Máquina tipo caída de masas de Impacto

Los ensayos de tracción y flexión fueron realizados en una máquina universal de ensayos. En el caso del ensayo de tracción, la longitud calibrada para medir la deformación fue de 50 mm y la velocidad de ensayo se fijó en 2 mm/min. Para el ensayo de flexión, se seleccionó el procedimiento A descrito en la norma, correspondiente a flexión en tres puntos, con una velocidad de ensayo de 1 mm/min. Por su parte, el ensayo de impacto se llevó a cabo mediante la caída de un dardo con una masa de 0.212 kg desde diferentes alturas.

Diseño y fabricación del molde

Para la elaboración de las probetas se diseñó un molde rectangular en el software Inventor, con capacidad para producir 15 muestras, 5 para cada tipo de ensayo. El molde fue fabricado en acero A36 mediante mecanizado CNC y consta de dos partes: una base y una tapa.

Las dimensiones principales del molde son 358 x 345 mm y cuenta con 16 orificios para la colocación de pernos que permiten aplicar presión sobre el material compuesto durante el proceso de moldeo. La tapa está equipada con dos manijas para facilitar su manipulación. Tanto la base como la tapa presentan un chaflán de 45° en su perímetro para garantizar un correcto ajuste entre ambas partes y permitir la salida de aire durante el cierre del molde.



Figura 1. Base y tapa del molde.

Corteza de eucalipto

La corteza de eucalipto utilizada en este estudio se recolectó de árboles ubicados en un bosque de la Provincia Bolívar, Ecuador, aprovechando el desprendimiento natural de la misma. Una vez obtenida, la corteza se sumergió en agua durante un día para ablandarla y facilitar la remoción del material orgánico que recubre las fibras. Posteriormente, se golpeó la corteza para separar las fibras, las cuales fueron cortadas a una longitud de 5 cm. A continuación, las fibras se lavaron con agua y jabón neutro para eliminar impurezas y se secaron en una estufa de convección forzada (marca Esco) a una temperatura de 105 °C durante 8 horas. El proceso de secado se llevó a cabo hasta alcanzar un contenido de humedad inferior al 8 %, verificado mediante un analizador de humedad Mettler Toledo HB43-S.



a. Obtención de la fibra



b. Limpieza de la fibra



c. Secado de la fibra



d. Análisis de humedad de la fibra

Figura 2. Obtención, limpieza, secado y análisis de humedad de la fibra de eucalipto.

Cálculo de las fracciones volumétricas

Para determinar las fracciones volumétricas adecuadas de resina poliéster y fibra de eucalipto en el compuesto, se empleó un método experimental basado en el principio de Arquímedes. Primero, se pesó una muestra de resina curada en una balanza. Luego, se llenó un recipiente plástico con 300 ml de agua y se sumergió completamente la muestra de resina. El cambio en el volumen de agua desplazada se midió, siendo este valor igual al volumen de la resina. Un procedimiento similar se siguió para determinar la densidad de la fibra de eucalipto, realizando cinco mediciones consecutivas.

Conociendo las densidades de la resina y la fibra, así como el volumen total del molde, se calcularon las fracciones en masa y volumen necesarias para obtener una lámina de material compuesto con las proporciones deseadas. La Tabla 3 muestra las cantidades de resina poliéster a utilizar según el volumen del molde, mientras que la Tabla 4 indica las cantidades de fibra requeridas en función de las fracciones volumétricas establecidas.

Tabla 3. Cantidad de resina poliéster requerida según el volumen del molde.

Muestra	Volumen total (cm ³)	Densidad (g/cm ³)	Porcentaje de matriz	Volumen de la matriz (cm ³)
Muestra 1	396	1.26	90 %	356.4
Muestra 2	396	1.26	80 %	316.8
Muestra 3	396	1.26	70 %	277.2
Total de volumen de resina poliéster				950.4

Tabla 4. Cantidad de masa de fibra requerida según el volumen del molde.

Muestra	Volumen total (cm ³)	Densidad (g/cm ³)	Porcentaje de refuerzo	Volumen del refuerzo (cm ³)	Masa calculada (g)
Muestra 1	396	0.55	10 %	39.6	21.78
Muestra 2	396	0.55	20 %	79.2	43.56
Muestra 3	396	0.55	30 %	118.8	65.34
Total de masa de la fibra					130.68

Obtención del material compuesto

El proceso de fabricación del material compuesto siguió una serie de pasos. Inicialmente, se colocó el molde sobre una superficie nivelada, verificando su planicidad con un instrumento de medición adecuado. Se aplicó un agente desmoldante en la superficie del molde para facilitar la posterior extracción de la lámina de compuesto. A continuación, se pesó la cantidad de fibra necesaria según las fracciones en masa previamente calculadas. Las fibras se distribuyeron uniformemente en el molde, procurando cubrir la mayor área posible.

La resina poliéster se preparó diluyéndola con un 10 % de estireno monómero para reducir su viscosidad y mejorar su capacidad de impregnación de las fibras. Posteriormente, se agregó un 1 % en volumen de octoato de cobalto como acelerante, lo que provocó que la mezcla adquiriera una coloración rosada. Finalmente, se añadió un 2.5 % en volumen de peróxido de metil etil cetona (MEKP) como catalizador, tornando la mezcla de color negro.

La mezcla de resina se vertió cuidadosamente en el molde, asegurando que se distribuyera de manera uniforme y cubriera por completo las fibras. Se verificó que no quedaran espacios vacíos ni burbujas de aire atrapadas. A continuación, se colocó la tapa del molde y se aplicó presión mediante el ajuste de pernos M10 con un torque de 30 lbf.ft. Transcurridas 4 horas, se procedió a desmoldar la lámina de material compuesto. El curado completo del compuesto se realizó a temperatura ambiente durante un período de dos semanas.

Finalmente, las láminas de compuesto se cortaron mediante láser según las dimensiones especificadas en las normas ASTM para la preparación de las probetas de ensayo. Las probetas fueron debidamente almacenadas y clasificadas de acuerdo con las fracciones volumétricas de refuerzo empleadas.



Figura 3. (a) Probetas de flexión;(b) probetas de impacto;(c) probetas de tracción.

RESULTADOS

Se realizaron ensayos destructivos de tracción, flexión e impacto especificados en normas ASTM para materiales compuestos poliméricos, con la finalidad de evaluar el comportamiento mecánico del nuevo material al ser sometido a diferentes fuerzas o cargas.

Ensayos de tracción

Se llevaron a cabo ensayos de tracción en 5 probetas por cada grupo de material compuesto y en 5 probetas de resina poliéster pura, siguiendo los lineamientos de las normas ASTM correspondientes. A partir de los datos registrados durante los ensayos, se obtuvieron aproximadamente mil mediciones que permitieron determinar la carga máxima aplicada, la resistencia a la tracción, la deformación a la rotura, el módulo elástico y el modo de falla de cada probeta. La Tabla 5 muestra los valores promedio de estas propiedades junto con su desviación estándar y los códigos de falla observados.

Tabla 5. Valores promedio de carga última, deformación, módulo de elasticidad y código de falla para el ensayo de tracción.

Fraciones volumétricas (%)	Carga Última (N)	Deformación última (%)	Módulo de elasticidad (MPa)	Código de falla	Decremento del esfuerzo máximo (%)	Incremento del módulo de elasticidad
100 % M/ 0 % R	3216.64 ±396.58	0.46 ±0.1	5563.08 ± 382.95	LGM MGM	0.00	0.00
90 % M/ 10 % R	1582.22 ±251.42	0.16 ±0.03	6716.88 ±259.44	AUT AGM AAT AWT	52.66	20.74
80 % M/ 20 % R	1329.81 ±250.89	0.16 ±0.05	5818.00 ±862.12	AUT LGM AGM AU	61.00	4.58
70 % M /30 % R	1665.81 ±217.22	0.22 ±0.05	5661.68 ± 672.95	AWT AWB AUB AUT	50.02	1.77

Los resultados obtenidos revelaron que la resina poliéster pura presentó la mayor resistencia a la tracción promedio con un valor de 26.49 ± 3.06 MPa. Esto indica que la incorporación de fibras de eucalipto en la matriz provocó una disminución de la resistencia a la tracción del compuesto. Además, se observó que la deformación a la rotura disminuyó a medida que se incrementó la fracción volumétrica de refuerzo en la matriz.

Este comportamiento frágil es característico de los materiales termoestables y sugiere que las fibras no logran detener eficazmente las dislocaciones en la matriz, actuando como concentradores de esfuerzos y aumentando la rigidez del compuesto. Entre las diferentes formulaciones estudiadas, el grupo de probetas con 70 % de matriz y 30 % de refuerzo (70 % M/ 30 %R) mostró la mejor combinación de propiedades en términos de resistencia a la tracción. Cabe destacar que los valores de resistencia y deformación a la rotura de los distintos compuestos no presentaron una amplia dispersión, como se aprecia en la Figura 4.

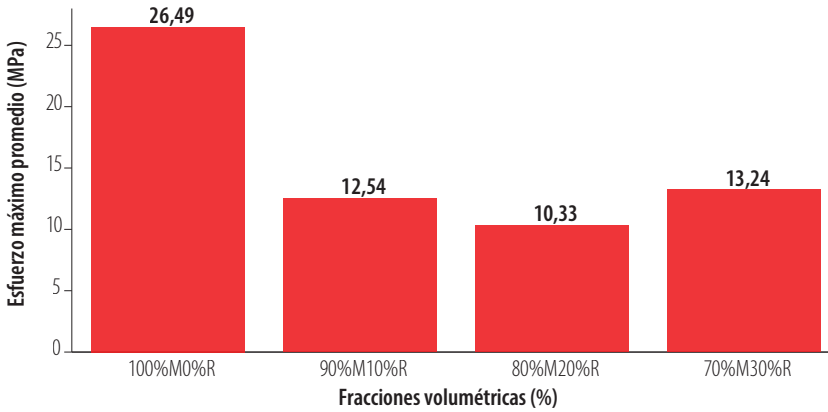


Figura 4. Comparación entre esfuerzos máximos a tracción.

La Figura 5 muestra el diagrama esfuerzo-deformación obtenido a partir de los ensayos de tracción realizados en las probetas del grupo 70 % M / 30 % R. Se puede apreciar una fractura abrupta del material compuesto, evidenciando su comportamiento frágil. Además, se observó que las fracturas se produjeron tanto en la zona calibrada como fuera de ella.

La disminución de la resistencia a la tracción del material compuesto en comparación con la resina poliéster pura podría atribuirse a la presencia de concentradores de esfuerzos, como defectos internos en las probetas, y a la orientación aleatoria de las fibras, que no contribuyó a mejorar esta propiedad. Es posible que la resistencia a la tracción del compuesto pudiera incrementarse si las fibras se orientaran en la dirección de aplicación de la carga.

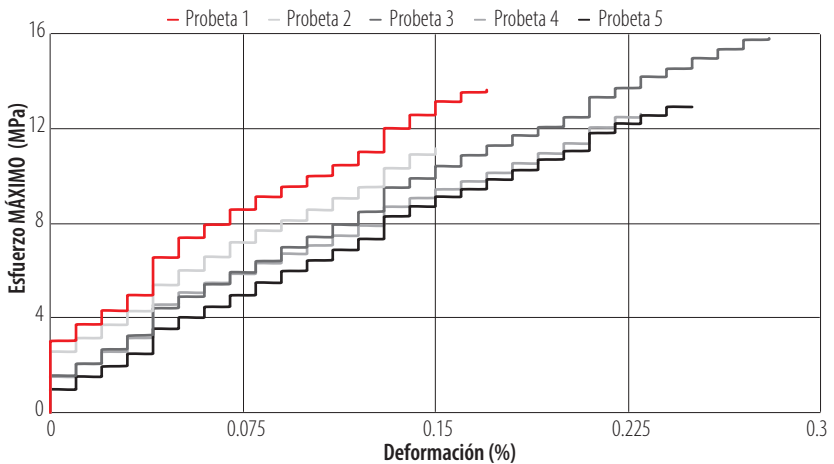


Figura 5. Diagrama esfuerzo vs deformación a tracción del grupo 70 % M / 30 % R.

Como se aprecia en la Figura 6, el módulo elástico del material compuesto aumentó con la incorporación de las fibras de eucalipto en la matriz de resina poliéster. Este comportamiento se observó en todas las fracciones volumétricas estudiadas. Además, el compuesto presentó una mayor elasticidad en la región elástica en comparación con la resina pura. Entre las diferentes formulaciones, el grupo de probetas con 90 % de matriz y 10 % de refuerzo (90 % M / 10 % R) mostró el valor más alto de módulo elástico a tracción.

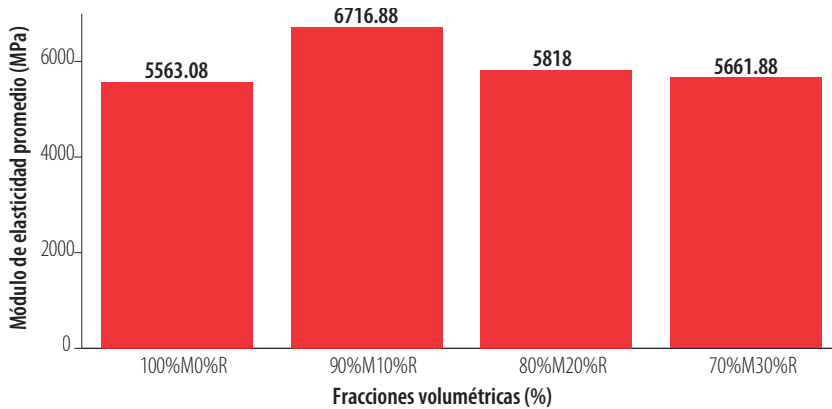


Figura 6. Comparación entre módulos de elasticidad a tracción.

Ensayo de flexión

Se realizaron ensayos de flexión en 5 probetas por cada fracción volumétrica de material compuesto y en 5 probetas de resina poliéster pura. A partir de aproximadamente 1000 mediciones registradas durante los ensayos, se determinaron la carga máxima aplicada, la resistencia a la flexión, la deformación a la rotura y el modo de falla de cada probeta. También se calculó el porcentaje de incremento o disminución de estas propiedades en comparación con la resina pura. La Tabla 6 muestra los valores promedio y la desviación estándar de los resultados obtenidos, así como los códigos de falla observados.

Tabla 6. Valores promedio de carga última, deformación, módulo de elasticidad y código de falla para el ensayo de flexión.

Fraciones volumétricas (%)	Carga Última (N)	Deformación última (%)	Módulo de elasticidad (MPa)	Código de falla	Decremento del esfuerzo máximo (%)	Incremento del módulo de elasticidad
100 % M / 0 % R	250.50±19.15	4.12±0.87	2551.69±166,64	MLV	0,00	0.00
90 % M / 10 % R	115.15±21.48	1.32±0.31	2656.87±100,95	MAM MLB	56.62	4.12
80 % M / 20 % R	106.77±12.42	1.19±0.15	2800.96±94,97	MAM MLT	59.84	9.77
70 % M / 30 % R	85.47±10.39	0.93±0.1	2872.18±160,53	MLT MAM MLB	67.71	12.56

Como se puede observar en la a, tanto la resistencia a la flexión como la deformación a la rotura del material compuesto disminuyeron en comparación con la resina poliéster pura. Esto indica que la presencia de las fibras de eucalipto en la matriz provocó un comportamiento más frágil del compuesto. Esta disminución de propiedades podría atribuirse a la presencia de concentradores de esfuerzos generados por defectos internos en las probetas y a una baja adhesión entre las fibras y la matriz. Se observó que las fallas se produjeron tanto en la zona de aplicación de la carga como fuera de ella. Entre las diferentes formulaciones estudiadas, el grupo de probetas con 90 % de matriz y 10 % de refuerzo (90 % M / 10 % R) presentó la mejor combinación de propiedades a flexión.

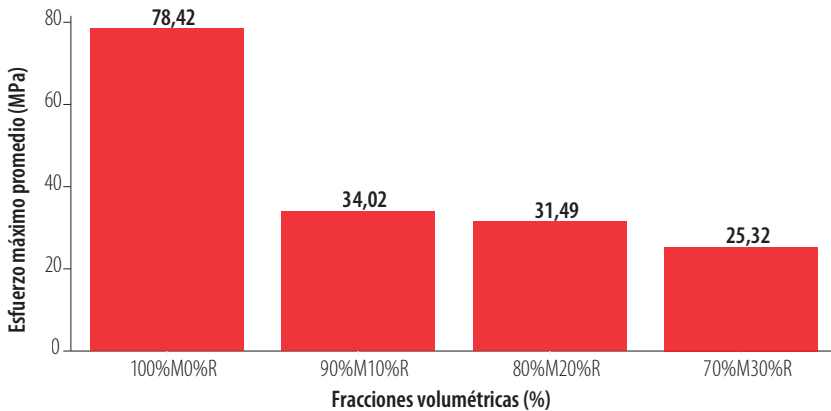


Figura 7. Comparación entre esfuerzos máximos a flexión.

El diagrama esfuerzo-deformación obtenido a partir de los ensayos de flexión realizados en las probetas del grupo 90 % M / 10 % R se muestra en la Figura 8. Se puede apreciar que el material compuesto trabaja principalmente en la región elástica, con una deformación plástica limitada. Esto sugiere que las fibras de eucalipto no proporcionaron el soporte estructural esperado para mejorar la resistencia a la flexión del compuesto.

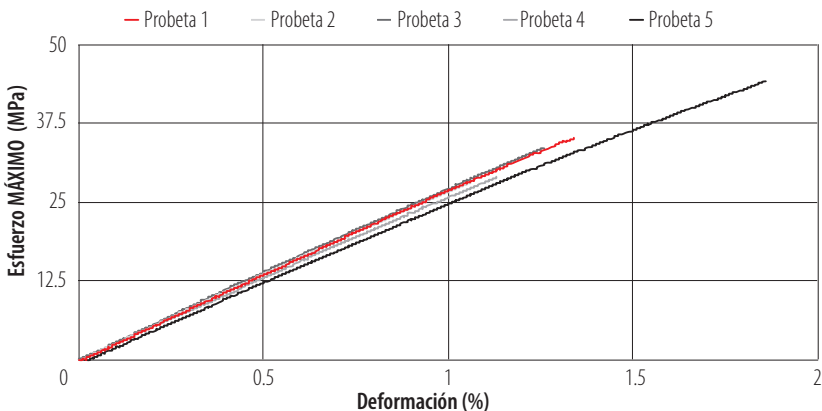


Figura 8. Diagrama esfuerzo vs deformación a flexión del grupo 90 % M / 10 % R.

La Figura 9 muestra la comparación entre los módulos elásticos a flexión de los diferentes grupos de probetas. Se observa que el módulo elástico aumentó con la incorporación de las fibras de eucalipto en la matriz de resina poliéster. El grupo de probetas con 70 % de matriz y 30 % de refuerzo (70 % M / 30 % R) presentó el mayor incremento en el módulo elástico, con un aumento del 12.56 % en comparación con la resina pura. Este aumento en el módulo elástico a flexión indica que el material compuesto presenta un comportamiento más elástico en comparación con la resina sin refuerzo, ampliando el rango de aplicación en el que se cumple la ley de Hooke.

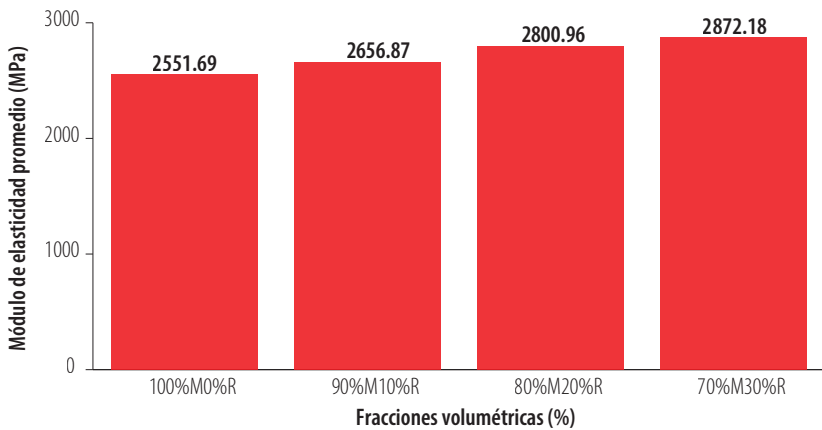


Figura 9. Comparación entre módulos de elasticidad a flexión.

Ensayo de impacto

Se llevaron a cabo ensayos de impacto en 5 probetas por cada fracción volumétrica de material compuesto y en 5 probetas de resina poliéster pura. Mediante 5 pruebas a diferentes alturas utilizando un dardo con una masa de 0.212 kg, se determinó la energía media de fallo que las probetas son capaces de absorber. Se calculó el porcentaje de incremento en la energía media de fallo del material compuesto en comparación con la resina pura, tomando como referencia el valor más alto correspondiente al grupo de probetas con 70 % de matriz y 30 % de refuerzo (70 % M / 30 % R), como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7. Energía media de fallo y fracciones volumétricas.

Fraciones volumétricas (%)	Masa aplicada (kg)	Altura media de fallo (mm)	Energía media de fallo (J)	Incremento de la energía media de fallo (%)
100 % M/ 0 % R	0.232	50-200	0.251±0.13	0.00
90 % M/ 10 % R	0.232	100-300	0.421±0.16	68.18
80 % M/ 20 % R	0.232	100-400	0.568±0.25	127.27
70 % M /30 % R	0.232	150-500	0.751±0.3	200.00

La Figura 10 ilustra la variación de la energía media de fallo en función de la fracción volumétrica de refuerzo en el material compuesto. Se observa claramente que la energía media de fallo aumenta a medida que se incrementa el contenido de fibras de eucalipto en la matriz. El grupo de probetas con 70 % de matriz y 30 % de refuerzo (70 % M / 30 % R) presentó el valor más alto de energía media de fallo entre todas las formulaciones estudiadas.

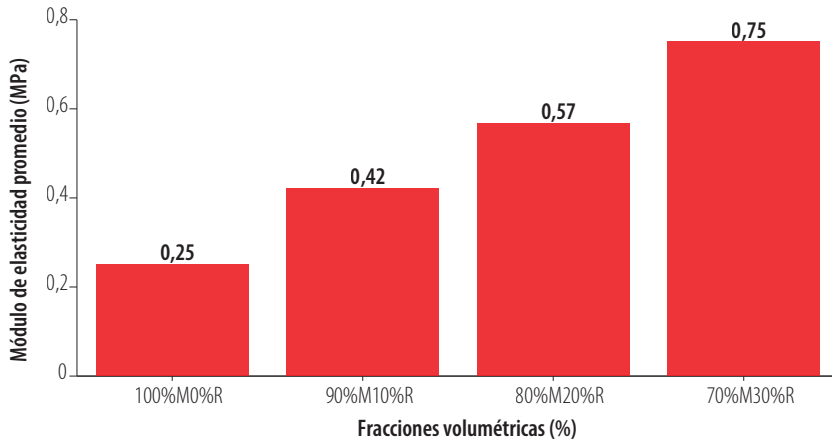


Figura 10. Comparación entre la energía media de fallo.

El aumento en la energía media de fallo del material compuesto se atribuye al efecto de refuerzo estructural proporcionado por las fibras de eucalipto, que fueron capaces de absorber la energía de impacto aplicada por el dardo. Esta energía se transfirió efectivamente desde la matriz hasta las fibras, lo cual es deseable en los materiales compuestos. Se observó un incremento máximo del 200 % en la energía media de fallo del compuesto con 70 % de matriz y 30 % de refuerzo en comparación con la resina poliéster pura.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este estudio demuestran que la incorporación de fibras de corteza de eucalipto en una matriz de resina poliéster tiene un efecto significativo en las propiedades mecánicas del material compuesto resultante. La disminución observada en la resistencia a la tracción y flexión del compuesto en comparación con la resina pura puede atribuirse a varios factores, como la presencia de concentradores de esfuerzos, defectos internos en las probetas y una baja adhesión entre las fibras y la matriz [4,5]. Estos resultados son consistentes con los hallazgos reportados por Sartor et al. [18] y De Oliveira et al. [19], quienes también observaron una reducción en las propiedades mecánicas de compuestos de polipropileno y poliéster reforzados con fibras de eucalipto.

Por otro lado, el aumento en el módulo elástico y la energía de impacto absorbida por el material compuesto sugiere que las fibras de eucalipto proporcionan un refuerzo estructural efectivo, incrementando la rigidez y la capacidad de absorción de energía



del material [6,7]. Estos resultados concuerdan con los estudios de Barbosa et al. [17] y De Oliveira et al. [20], quienes reportaron mejoras en la tenacidad y el módulo elástico de compuestos reforzados con fibras de eucalipto.

La combinación de 70 % de matriz y 30 % de refuerzo presentó el mejor balance de propiedades mecánicas entre las diferentes formulaciones estudiadas. Este hallazgo sugiere que existe una proporción óptima de matriz y refuerzo que maximiza el desempeño mecánico del material compuesto [8]. Sin embargo, es importante considerar que la orientación aleatoria de las fibras en el compuesto puede limitar su capacidad de refuerzo en comparación con una orientación controlada en la dirección de la carga aplicada [16].

Los resultados de este estudio destacan el potencial de los materiales compuestos reforzados con fibras naturales como una alternativa sostenible a los compuestos tradicionales reforzados con fibras sintéticas [11,12]. El uso de fibras de corteza de eucalipto, un recurso renovable y abundante en Ecuador, puede contribuir a reducir el impacto ambiental asociado a la producción de materiales compuestos, al tiempo que se aprovechan los recursos naturales disponibles en el país [9,10].

Sin embargo, es necesario realizar más investigaciones para optimizar el proceso de fabricación de estos compuestos, mejorar la adhesión entre las fibras y la matriz, y evaluar su durabilidad a largo plazo bajo diferentes condiciones ambientales [13,14]. Además, se deben explorar técnicas de tratamiento superficial de las fibras y el uso de agentes de acoplamiento para mejorar la compatibilidad y la transferencia de carga entre las fases del compuesto [15].

En conclusión, los materiales compuestos reforzados con fibras de corteza de eucalipto presentan propiedades mecánicas prometedoras y tienen potencial para diversas aplicaciones industriales. La incorporación de estas fibras en una matriz de resina poliéster afecta significativamente las propiedades mecánicas del material compuesto resultante, siendo la combinación de 70 % de matriz y 30% de refuerzo la que presentó el mejor balance de propiedades mecánicas entre las diferentes formulaciones estudiadas. El uso de fibras de corteza de eucalipto, un recurso renovable y abundante en Ecuador, puede contribuir a reducir el impacto ambiental asociado a la producción de materiales compuestos. Sin embargo, se requieren más investigaciones para optimizar el proceso de fabricación, mejorar la adhesión fibra-matriz y evaluar la durabilidad a largo plazo de estos compuestos. Este estudio sienta las bases para el desarrollo de nuevos materiales ecológicos y contribuye a impulsar la investigación en el campo de los compuestos reforzados con fibras naturales.

AGRADECIMIENTOS

El autor desea expresar su gratitud a la Universidad Politécnica Salesiana por el apoyo y guía para la elaboración del proyecto de investigación "Desarrollo de materiales compuestos sostenibles reforzados con fibras naturales" (código del proyecto: UPS-12345) y de manera especial al Ingeniero Milton Salomón Jami Lema, Docente de la Carrera de Mecánica.



Asimismo, expresamos nuestra gratitud al personal del Laboratorio de Materiales y de Biotecnología de la Universidad Politécnica Salesiana por su asistencia técnica durante la caracterización mecánica de los materiales compuestos.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Conceptualización: Jimmy David García Quiroz, Byron Darío Analuiza Hidalgo, Wilson Gabriel Agualongo Amangandi, Milton Xavier Remache Sasig.

Metodología: Jimmy David García Quiroz, Byron Darío Analuiza Hidalgo, Wilson Gabriel Agualongo Amangandi, Milton Xavier Remache Sasig.

Investigación: Jimmy David García Quiroz, Byron Darío Analuiza Hidalgo, Wilson Gabriel Agualongo Amangandi, Milton Xavier Remache Sasig.

Recursos: Jimmy David García Quiroz, Byron Darío Analuiza Hidalgo, Wilson Gabriel Agualongo Amangandi, Milton Xavier Remache Sasig.

Redacción - Borrador original: Jimmy David García Quiroz, Byron Darío Analuiza Hidalgo, Wilson Gabriel Agualongo Amangandi, Milton Xavier Remache Sasig.

Redacción - Revisión y edición: Jimmy David García Quiroz, Byron Darío Analuiza Hidalgo, Wilson Gabriel Agualongo Amangandi, Milton Xavier Remache Sasig.

Visualización: Jimmy David García Quiroz, Byron Darío Analuiza Hidalgo, Wilson Gabriel Agualongo Amangandi, Milton Xavier Remache Sasig.

Supervisión: Jimmy David García Quiroz, Byron Darío Analuiza Hidalgo, Wilson Gabriel Agualongo Amangandi, Milton Xavier Remache Sasig.

Administración del proyecto: Jimmy David García Quiroz, Byron Darío Analuiza Hidalgo, Wilson Gabriel Agualongo Amangandi, Milton Xavier Remache Sasig.

Adquisición de fondos: Jimmy David García Quiroz, Byron Darío Analuiza Hidalgo, Wilson Gabriel Agualongo Amangandi, Milton Xavier Remache Sasig.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran no tener conflictos de interés sobre esta investigación.



REFERENCIAS

- [1] Kushwaha, S., & Bagha, A. K. (2020). Application of composite materials for vibroacoustic—A review. *Materials Today: Proceedings*, 26. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.321>
- [2] Singh, A. K., Bedi, R., & Kaith, B. S. (2020). Mechanical properties of composite materials based on waste plastic—A review. *Materials Today: Proceedings*, 26 (2). doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.258>
- [3] Rajak, D. K., Pagar, D. D., Kumar, R., & Pruncu, C. I. (2019). Recent progress of reinforcement materials: A comprehensive overview of composite materials. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(6). doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.09.068>
- [4] Sharma, A. K., Bhandari, R., Aherwar, A., & Rimašauskiene, R. (2020). Matrix materials used in composites: A comprehensive study. *Materials Today: Proceedings*, 21 (3). doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.11.086>
- [5] Sabari Narayanan, G., & Senthil Kumar, K. (2020). Study of mechanical properties of the polymer matrix composite material (solid wool). *Materials Today: Proceedings*, 33. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.792>
- [6] Kumar, G. C., Baligidad, S. M., Maharudresh, A. C., Dayanand, N., & Chetan, T. N. (2021). Development and investigation of the mechanical properties of natural fiber reinforced polymer composite. *Materials Today: Proceedings*, 50 (5). doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.128>
- [7] Mahesh, V., Joladarashi, S., & Kulkarni, S. M. (2021). A comprehensive review on material selection for polymer matrix composites subjected to impact load. *Defence Technology*, 17 (1). doi: <https://doi.org/10.1016/j.dt.2020.04.002>
- [8] Sánchez Safont, E. L. (2018). *Desarrollo y caracterización de compuestos biodegradables basados en polihidroxialcanoatos y fibras lignocelulósicas para aplicaciones de un solo uso*. Repositorio Universidad Jaume I, 47–55.
- [9] Maithil, P., Gupta, P., & Chandravanshi, M. L. (2023). Study of mechanical properties of the natural-synthetic fiber reinforced polymer matrix composite. *Materials Today: Proceedings*, 1–7. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.01.245>
- [10] Bhat, A. R., Kumar, R., & Mural, P. K. S. (2023). Natural fiber reinforced polymer composites: a comprehensive review of tribo-mechanical properties. *Tribology International*, 189. doi: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.108978>
- [11] Murugan, K., Venkatesh, S., Thirumalai, R., & Nandhakumar, S. (2021). Fabrication and investigations of kenaf fiber and banana fiber reinforced composite material. *Materials Today: Proceedings*, 37, 110–114. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.540>
- [12] Gohal, H., Kumar, V., & Jena, H. (2019). Study of natural fibre composite material and its hybridization techniques. *Materials Today: Proceedings*, 26, 1368–1372. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.277>
- [13] Llanes-Cedeño, E. A., Peralta-Zurita, D., Pucha-Tambo, M., & Rocha-Hoyos, J. C. (2019). Caracterización mecánica a flexión de materiales compuestos con matriz fotopolimérica reforzados con fibras de abacá y cabuya mediante impresión 3D Ingenius. *Revista de Ciencia y Tecnología*, 22. http://scielo.senescyt.gub.ec/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1390-860X2019000200100&lng=es&tlng=es
- [14] Sajin, J. B., Aurtherson, P. B., Binoj, J. S., Manikandan, N., Senthil Saravanan, M. S., & Haarison, T. M. (2020). Influence of fiber length on mechanical properties and microstructural analysis of jute fiber reinforced polymer composites. *Materials Today: Proceedings*, 39. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.623>
- [15] Umanath, K., Prabhu, M. K., Yuvaraj, A., & Devika, D. (2020). Fabrication and analysis of master leaf spring plate using carbon fibre and pineapple leaf fibre as natural composite materials. *Materials Today: Proceedings*, 33. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.790>
- [16] Getu, D., Nallamothu, R. B., Masresha, M., Nallamothu, S. K., & Nallamothu, A. K. (2021). Production and characterization of bamboo and sisal fiber reinforced hybrid composite for interior automotive body application. *Materials Today: Proceedings*, 38. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.780>
- [17] Barbosa, A. D. P., Muylaert Margem, F., Oliveira, C. G., Tonini Simonassi, N., de Oliveira Braga, F., & Monteiro, S. N. (2016). Charpy toughness behavior of eucalyptus fiber reinforced polyester matrix composites. *Materials Science Forum*, 869. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.869.227>
- [18] Sartor, M. B., de Matos Prosdocieni, H., de Oliveira Gondak, M., Bronzato, G. R. F., & Leão, A. L. (2017). Produção e caracterização mecânica do compósito de polipropileno e casca de eucalipto. *Energia na agricultura*, 32(4). doi: <https://revistas.fca.unesp.br/index.php/energia/article/view/2748>



- [19] Oliveira, C. G. d., Margem, F. M., Monteiro, S. N., & Lopes, F. P. D. (2017). Comparison between tensile behavior of epoxy and polyester matrix composites reinforced with eucalyptus fibers. *Journal of Materials Research and Technology*, 6(4), 406–410. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2017.08.002>
- [20] De Oliveira, C. G., de Deus, J. F., de Moraes, Y. M., Fonseca, M. V., Souza, D., Margem, F. M., ... & Monteiro, S. (2017). Tensile behavior of epoxy matrix composites reinforced with pure ramie fabric. *Minerals, Metals & Materials Series*, 415–421. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-51382-9_45
- [21] Pinnell, M., Fields, R., & Zabora, R. (2005). Results of an interlaboratory study of the ASTM standard test method for tensile properties of polymer matrix composites D 3039. *Journal of Testing and Evaluation*, 33(1), 27-31. doi: <https://doi.org/10.1520/JTE12521>
- [22] ASTM International. (2007). ASTM D 7264, "Standard test method for flexural properties of polymer matrix composite materials." *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. I, 1-11.
- [23] ASTM International. (2012). ASTM E2248-12: Standard test method for impact testing of miniaturized Charpy V-notch specimens. *ASTM International*. doi: <https://doi.org/10.1520/E2248-12>