

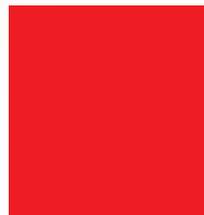
Vol. 14, Núm. 1 (2022)

aci

avances
en ciencias e
ingenierías



Generación de
tecnologías
en el cultivo de
MAÍZ
en Iberoamérica



aci

avances
en ciencias e
ingenierías

ACI Avances en Ciencias e Ingenierías

ISSN(e): 2528-7788
ISSN (impreso): 1390-5384
<http://avances.usfq.edu.ec/>
Quito, Ecuador

16/05/2022

DOI: <https://doi.org/10.18272/aciv141>

ACI Avances en Ciencias e Ingenierías es una revista científica con revisión por pares (*peer-reviewed*), de acceso abierto (*open access*), e indexada que publica trabajos en ciencias exactas, físicas, biológicas, ambientales, ingenierías, e investigaciones en el interfaz de estas disciplinas desarrollados por científicos de cualquier institución o país.

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: MIAR, Latindex y Latindex 2.0, Archive.org, ROAD, DOAJ, REDIB, Google Scholar, Crossref, SIS.

Editora General: Eva O.L. Lantsoght, Politécnico, Universidad San Francisco de Quito USFQ, Ecuador y Delft University of Technology, Delft, Países Bajos

Editores del dossier: Gabriela Albán¹, Mario Caviedes¹ y José L. Zambrano²

¹ Politécnico, Universidad San Francisco de Quito USFQ, Ecuador

² Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias INIAP, Ecuador

Editores asociados

Daniela Almeida Streitwieser^{1,3}

Elisa Bonaccorso²

Diego F. Cisneros-Heredia²

Oihane Fernández Blanco⁴

Melissa Infusino¹

René Parra Narváez¹

Diana Alexandra Pazmiño²

Esteban Suárez²

Lionel Trojman⁵

¹ Politécnico, Universidad San Francisco de Quito USFQ, Ecuador

² COCIBA, Universidad San Francisco de Quito USFQ, Ecuador

³ Reutlingen University, Alemania

⁴ Investigadora independiente

⁵ Institut supérieur d'électronique de Paris, Francia

Consejo editorial

Andrea Arias, DuPont Pioneer, Johnston, IA, Estados Unidos

Carlos Ventura, The University of British Columbia, Vancouver, BC, Canadá

César Costa, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, Ecuador

César Iván Alvarez-Mendoza, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador

Janio Jardán, Universidad Tecnológica Indoamérica, Quito, Ecuador

Johannio Marulanda Casas, Universidad del Valle, Cali, Colombia

John Blake, University of Florida, Gainesville, FL, Estados Unidos

Luis Rincón, Universidad de Los Andes, Mérida, República Bolivariana de Venezuela

Nikolay Aguirre, Universidad Nacional de Loja, Loja, Ecuador

Nora Oleas, Universidad Tecnológica Indoamérica, Quito, Ecuador

Oswaldo Morales Nápoles, Delft University of Technology, Países Bajos

Robert Cazar, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador

Ruth Mariela Alvarez, Universidad de Carabobo, República Bolivariana de Venezuela

Salvador Godoy, Instituto Politécnico Nacional, México, México D.F.

Santiago Ron, Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Ecuador

Yenisel Plasencia-Calaña, Maastricht University, Países Bajos

International Scientific Committee

Paula Rojas, Universidad Adolfo Ibáñez, Santiago, Chile

Gabriela Guevara, Universidad Técnica de Berlín, Germany

Patricia Conde Cespedes, ISEP - École d'ingénieurs du numérique, France

Tiziano Perea, Universidad Autónoma Metropolitana, México

Howard Ramirez-Malule, Universidad del Valle, Colombia

Patrick Venail, Universidad de Ingeniería & Tecnología, Perú

Victor Murray, Universidad de Ingeniería & Tecnología, Perú

Julio Valdivia-Silva, Universidad de Ingeniería & Tecnología, Perú

Luca Sorriso-Valvo, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Rome, Italy

Producción editorial: USFQ PRESS

Corrección de estilo y ortotipográfica: Gabriel Ortiz Armas, Alejandro Valdivieso

Diseño general: Krushenka Bayas Ramírez

Diseño de cubierta: Diego Andrés Anrrango Gómez

Fotografía de cubierta: Freepik

Webmaster y manejo de OJS: Jaime Páez, Gabriel Ortiz Armas

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 o omisiones que se hayan podido realizar.

USFQ PRESS / ACI Avances en Ciencias e Ingenierías

Att. Eva Lantsoght, editora

Universidad San Francisco de Quito USFQ

Calle Diego de Robles y Pampite. Campus Cumbayá

Quito 170901, Ecuador.

Correo electrónico: avances@usfq.edu.ec - usfqpress@usfq.edu.ec

Contenido

Editorial

Generación de tecnologías en el cultivo de maíz en Iberoamérica

Gabriela Albán Guijarro

Waste Biomass as an energy and materials resource

Juan Sebastián Proaño

Sección B: Ciencias Biológicas y Ambientales

Análisis microbiológico de preparados en polvo para lactantes comercializados en Quito, Ecuador

Microbiological quality of powdered infant formula sold in Quito, Ecuador

Kimberly V. Carrión Albán, Lorena Goetschel Gómez, Rommy I. Terán Soto

Optical aptasensor for *in situ* detection and quantification of methylxanthines in *Ilex guayusa*

Aptasensor óptico para la detección y cuantificación *in situ* de metilxantinas en *Ilex guayusa*

Brigitte León, Diana Mollocana, Diana Calderón, Andrea Montero-Olea, María de Lourdes Torres

Ciencia ciudadana e interacciones entre aves nectarívoras y plantas de páramo en el Parque Nacional Cajas

Citizen science and interactions between nectarivorous birds and paramo plants at Cajas National Park

Xavier Iñiguez Vela, Juan Manuel Aguilar Ullauri

Estudio preliminar de la microbiota foliar de banano y su variación en presencia del patógeno Sigatoka Negra (*Pseudocercospora fijiensis*)

Preliminar study on the foliar microbiome in banana and its variation in presence of Black Sigatoka pathogen (*Pseudocercospora fijiensis*)

Alejandra Paladines-Montero, Claudia Zapata, Darío X. Ramírez-Villacís y Antonio León-Reyes

Sección C: Ingenierías

Labor displacement effects over inter-temporal earnings mobility

Efectos intertemporales del desplazamiento laboral sobre la movilidad de ingresos

Nicolle Jaramillo

Análisis de la producción de maíz en España

Analysis of the maize production in Spain

José L. Gabriel, Diana Martín-Lammerding, Raúl Allende-Montalbán, M. Mar Delgado, José A. Rodríguez-Martín

Generación de maíces especializados para mejorar la salud y nutrición en México

Specialty maize generation to improve health and nutrition in Mexico

Ricardo Ernesto Preciado-Ortiz, María Gricelda Vázquez-Carrillo

La producción de maíz en Argentina

Maize production in Argentina

Daniel A. Presello, Fernando J. Giménez y Facundo J. Ferraguti

Situación del cultivo de maíz en Guatemala: principales limitaciones en la productividad

Maize cultivation in Guatemala: main limitations

Orsy Franklin Chávez Martínez

Situación actual y avances tecnológicos para mejorar la productividad del cultivo de maíz (*Zea mays* L.) en Colombia

Current situation and technological advances to improve the productivity of maize (*Zea mays* L.) in Colombia

Jose Jaime Tapia Coronado, Liliana Margarita Atencio Solano, Julio Ramirez Duran, Karen Viviana Osorio Guerrero, Javier Castillo Sierra, Sergio Mejía Kerguelén

Tecnologías disponibles para incrementar la producción de maíz en Perú

Technologies available to increase corn production in Perú

Luis A. Narro León, Alexander Chávez Cabrera, Teófilo W. Jara Calvo, Teodoro P. Narro León, Alicia E. Medina Hoyos, Isaac Cieza Ruiz, Percy Díaz Chuquisuta, Roberto Alvarado Rodríguez, Fernando Escobal Valencia

Hitos tecnológicos que cambiaron el rol de Brasil en la producción de maíz: 30 años de crecimiento para convertirse en importante actor del escenario mundial, una revisión

Technological milestones that changed Brazil's role in corn production: 30 years of growth to become an important player on the world stage, a review

Lauro José Moreira Guimarães, Frederico Ozanan Machado Durães, Maria Marta Pastina, Roberto Willians Noda, Sidney Netto Parentoni, Paulo Evaristo de Oliveira Guimarães, Roberto dos Santos Trindade, José Luis Zambrano

Tecnologías para el cultivo de maíz (*Zea mays* L.) en el Ecuador

Generation of technologies for the cultivation of corn (*Zea mays* L.) in Ecuador

Mario Caviedes, Francisco E. Carvajal-Larenas, José L. Zambrano

Proceso editorial

Generación de tecnologías en el cultivo de maíz en Iberoamérica

Gabriela Albán^{1*}

¹Universidad San Francisco de Quito USFQ, Quito 170901, Ecuador

* Corresponding author/ Autor principal: galban@usfq.edu.ec

El maíz es el principal cereal que se produce en el mundo. Durante el año 2020 se cosecharon 1 162 millones de toneladas de maíz, con una producción promedio de 5,75 t ha⁻¹, superando significativamente a la cantidad cosechada de arroz o trigo (756 y 760 millones de toneladas de grano, respectivamente). Una parte de la producción de maíz se consume de manera directa, cumpliendo un importante rol en la seguridad alimentaria del planeta; mientras que otra parte de la producción de grano se destina para la elaboración de productos farmacéuticos, cosméticos, biocombustibles, entre otros.

En las Américas, el maíz está relacionado, además, a costumbres y tradiciones de los pueblos, quienes lo conservan y consumen asociado a festividades y eventos culturales arraigados con su historia. Todos estos factores hacen del maíz no solo un importante *comodity*, sino también un alimento fundamental para la población.

En el marco del 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), se planteó la necesidad de establecer una línea base de inicio del proyecto, que permita identificar brechas productivas y tecnológicas relacionadas con el cultivo de maíz en Iberoamérica. Con este fin, se realizó una convocatoria a coordinadores nacionales de I+D+i de Iberoamérica con experiencia en la producción y mejoramiento del maíz para presentar un artículo tipo *review* que describa la situación del cultivo en su país de origen, con los limitantes, avances y proyecciones que tiene el cultivo en cada país.

Este dossier publicado por la revista *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías* de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, tiene como objetivo compilar, describir y analizar las principales tecnologías disponibles en Iberoamérica para la producción de maíz, identificando limitantes y potencialidades para la producción de este cereal. Este documento servirá como prefacio de la XXIV Reunión Latinoamericana del Maíz que se realizará en Cajamarca, Perú, del 15 al 17 de junio de 2022, donde se presentará este documento que servirá de base para la identificación de fortalezas y debilidades comunes, que permitan diseñar futuros programas o proyectos de investigación e innovación tendientes a incrementar de manera sostenible la producción de este importante cereal en la región.

Esta edición está dirigida principalmente a grupos de Investigación, Desarrollo Tecnológico e innovación (I+D+i) relacionados con el cultivo de maíz en Iberoamérica; gran parte de ellos asociados a la Red Latinoamericana del Maíz, que está conformada por investigadores y técnicos de los institutos públicos de investigación de Iberoamérica (INIAs), el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT), universidades latinoamericanas y otros centros de investigación e innovación.



Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial 4.0



Recibido /
Received:
22/03/2022

Publicado en línea /
Published online:
16/05/2022



Docentes-Investigadores de la Universidad San Francisco de Quito USFQ forman parte de la Red Latinoamericana del Maíz, y están apoyando a el fortalecimiento de capacidades y el intercambio de experiencias entre grupos de Investigación, Desarrollo Tecnológico e Innovación (I+D+i) relacionados con sistemas de producción cuyo principal componente es el maíz en Iberoamérica. La Red está formada por 51 grupos de investigación y desarrollo tecnológico agrícola de 12 países (Argentina, Bolivia, Perú, Ecuador, Colombia, Brasil, El Salvador, México, Guatemala, Uruguay, Venezuela y España). Entre las principales instituciones, cuyos miembros forman parte de la Red Latinoamericana del Maíz se encuentran: Universidad San Francisco de Quito USFQ, Universidad Nacional de Cajamarca (UNC), Universidad Nacional Pedro Ruíz Gallo (UNPRG), Instituto de Educación Superior Tecnológica Pública Bambamarca, Universidad Autónoma Gabriel René Moreno (UAGRM), Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí (ESPAM), Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), Universidad Central del Ecuador (UCE), Universidad Técnica de Manabí (UTM), Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA, Argentina), Empresa Brasileira de Investigación Agropecuaria (EMBRAPA, Brasil), Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA, Colombia), Instituto Nacional de Innovación Agropecuaria y Forestal (INIAF, Bolivia), Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP, Ecuador), Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA, España), Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA, Perú), Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícolas (ICTA, Guatemala), Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP, México), Fundación Valles (Bolivia) y el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT).

La Red pretende capacitar a investigadores y técnicos en el uso de nuevas herramientas tecnológicas y fomentar el intercambio de experiencias para un manejo sostenible de los sistemas de producción de maíz y además de apoyar la organización de la Reunión Latinoamericana de Maíz y otros eventos organizados por los países de la región para presentar, analizar, discutir y difundir los avances tecnológicos del cultivo en la región.

Waste Biomass as an energy and materials resource

Juan Sebastián Proaño¹

¹Universidad San Francisco de Quito

* Corresponding author/ Autor principal: jsproano@usfq.edu.ec

Nowadays, the need to recover the post-pandemic economy, find solutions for climate change through sustainable practices, decarbonize human activities, and close the industrial circularity loops keeps the biomass research field active and dynamic. The research topics include creative uses of biomass as feedstock to produce materials and energy.

Biomass is, by definition, a renewable energy and materials resource. Biomass production worldwide depends on multiple factors predominantly driven by the pursuit of energy and food independence and security of each country. With the dynamic geopolitical activity, large traditionally arable areas and new cultivation sites are productive, yielding waste biomass. The yearly worldwide production of plant waste biomass surpasses 140 Gt [1], an astronomical number; however, most of it is not utilized. Other biomass sources are the forestry industry, municipal solid waste, and dedicated energy/materials crops.

Private and public sectors in many countries are pursuing Decarbonization targets. These aim for balancing anthropogenic greenhouse emissions sources and sinks by 2050, popularized in the Paris Agreement. By slowing down carbon-containing emissions production and further sequestering some of it, humanity will decrease the concentration of greenhouse gases, aiming to weaken climate change. Fossil-derived fuels, materials, and chemicals are a significant source of carbon-containing emissions, so moving away from them or using them efficiently may help decelerate atmospheric carbon inputs. However, existing carbon needs to be removed to decrease the carbon concentration in the air.

The photosynthetic capabilities of plants include capturing CO₂ using sunlight to grow biomass, pumping carbon into their structures, and storing energy as chemical bonds. Traditionally, the old bioeconomy used these plants for energy and construction materials. However, the rapid increase in the use of coal and petroleum fueled the industrial revolution and relegated the biomass option. Noteworthy, biomass cultivation remains a viable option to obtain chemical building blocks, heat, structural materials, dyes, medicine, and food. Furthermore, if some of the carbon in biomass can satisfy human needs and the rest can be locked into the ground, with the added benefit of soil amendment, i.e., biochar production and sequestration, the atmospheric carbon content will be reduced. This option could be one of the tools for decarbonizing human activity. However, many other efforts should coexist to decrease atmospheric greenhouse gases within a reasonable timeframe.

Biomass production challenges include land-use change effects, soil health decline, and biomass source geographical dispersion. Local development initiatives can tackle many of these issues by allowing biomass cultivation for local needs, maintaining the waste biomass in the region for preserving soil health, and preventing long transportation of



Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial 4.0



Recibido /
Received:
12/04/2022

Publicado en línea /
Published online:
16/05/2022



resources to central processing facilities. Additionally, local families could benefit from creating waste biomass markets as a source of additional income.

A plethora of waste biomass applications can be found in the literature, like biopolymers production, supercapacitors, high strength fibers, nanomaterials, food flavoring, biofuels, bio-solvents, filtering media, photothermal materials, hydrogels, pharmaceuticals, nutraceuticals, bioactive compounds, catalysts, sugars, alcohols, acids, biochar, and chemical building blocks. Despite challenges of their own, most of the applications have excellent potential to become commercially available in the near future. As always, more research is needed.

In an ever-growing energy and materials market, waste biomass brings opportunities to fight climate change, proposes important routes for decarbonization, and is at the center of the bioeconomy. Many challenges are preventing biomass endeavors from becoming commercially available; however, today and tomorrow's research community and brilliant minds will find the solutions to these challenges.

WEB REFERENCES

<https://www.ieabioenergy.com/blog/publications/iea-bioenergy-countries-report-update-2021/>

<https://www.un.org/en/climatechange/net-zero-coalition>

<http://www.worldbioenergy.org/uploads/201210%20WBA%20GBS%202020.pdf>

JOURNAL ARTICLE REFERENCE

- [1] Tripathi, N., Hills, C. D., Singh, R. S., & Atkinson, C. J. (2019). Biomass waste utilisation in low-carbon products: harnessing a major potential resource. *NPJ Climate and Atmospheric Science*, 2(1), 1-10. doi: <https://doi.org/10.1038/s41612-019-0093-5>

Análisis microbiológico de preparados en polvo para lactantes comercializados en Quito, Ecuador

Kimberly V. Carrión Albán¹, Lorena Goetschel Gómez², Rommy I. Terán Soto^{1*}

¹ Universidad Central del Ecuador, Facultad de Ciencias Químicas, Quito Ecuador.

² Universidad de las Américas, Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Quito Ecuador.

* Autor para Correspondencia / Corresponding Author, e-mail: riteran@uce.edu.ec

Microbiological quality of powdered infant formula sold in Quito, Ecuador

Abstract

Human milk is recognized as the best form of nutrition for infants. However, where breast-feeding is not possible, infant milk formulas are used as breast milk substitutes. These formulas provide infants essential nutrients for their normal growth and development, but pathogenic microbes responsible for serious illness could contaminate them. The purpose of this study was to investigate the microbial quality of powdered formulas sold in Quito. A total of 12 powdered infant formulas and 12 powdered follow-up formulas were collected from markets in Quito in 2019. Microbiological quality of samples was analyzed using conventional culture methods. According to the microbiological criteria specified in the Ecuadorian regulation, all powdered infant formulas complied with the total count of aerobic mesophilic organisms and enterobacteria. However, six powdered follow-up samples failed to comply with the regulation. *Salmonella* spp. and *Staphylococcus aureus* were not found in any sample. The isolated foodborne pathogens in the follow-up formulas were *Bacillus cereus* (25%) and *Hafnia alvei* (16,7%). *Escherichia coli*, a fecal-indicator organism was present in 8,3% of follow-up samples. The follow-up formulas were also contaminated by other enterobacteria like *Klebsiella oxytoca* and *Enterobacter aerogenes* (25% each) and *Pantoea agglomerans* (8,3%). The enterobacteria found in powdered infant formulas were *Klebsiella oxytoca* (41,7%), *Pantoea agglomerans* and *Citrobacter freundii* (25% each). Bacteria associated with non-adherence to Good Manufacturing Practices were *Bacillus subtilis* isolated in infant and follow-up formulas 16,7% and 75%, respectively and *Pseudomonas* sp. in 8,3% of infant milk. This study indicates the necessity of conducting further microbial contamination research in powdered formula products because they could be a potential source of food contaminants and a risk for infants and babies.

Keywords: powdered milk formula, follow-up formula, foodborne infections, foodborne pathogens.

Resumen

La leche materna es el alimento más completo para los lactantes. Sin embargo, cuando no es posible la lactancia materna, los preparados comerciales en polvo son utilizados



Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /
Edited by:
Daniela Almeida

Recibido /
Received:
07/05/2021

Aceptado /
Accepted:
16/11/2021

Publicado en línea /
Published online:
16/05/2022



como sustitutos. Estas fórmulas están diseñadas para proveer de nutrientes suficientes, garantizando el óptimo crecimiento de los niños, pero al no ser estériles podrían ser portadoras de microorganismos que afecten a este grupo susceptible. El objetivo de este estudio fue determinar la calidad microbiológica de muestras de productos para consumo local. Para esto, un total de 24 preparados lácteos (12 de inicio y 12 de continuación) fueron adquiridos en tiendas y supermercados en Quito en el año 2019. Se utilizaron métodos de cultivo convencionales para determinar la cantidad de aerobios totales y de enterobacterias, y para identificar los microorganismos presentes. De acuerdo con los criterios microbiológicos especificados en las normas ecuatorianas del Instituto Nacional de Normalización, todos los preparados de inicio cumplieron con los criterios microbiológicos, tanto para aerobios como para enterobacterias. Mientras que, el 50% de preparados infantiles de continuación sobrepasaron los valores establecidos en la norma tanto para aerobios como para enterobacterias. *Salmonella* spp. ni *Staphylococcus aureus* fueron aislados en ninguna muestra. Los patógenos de transmisión alimentaria identificados en los preparados de continuación fueron *Bacillus cereus* (25%) y *Hafnia alvei* (16,7%). *Escherichia coli*, un indicador de contaminación fecal, estuvo presente en el 8,3% de las muestras de continuación. Otras enterobacterias en las fórmulas de continuación fueron *Klebsiella oxytoca* y *Enterobacter aerogenes* (25% cada uno) y *Pantoea agglomerans* (8,3%). En los preparados de inicio se aislaron *Klebsiella oxytoca* (41,7%), *Pantoea agglomerans* y *Citrobacter freundii* (25% cada uno). *Bacillus subtilis* como una bacteria asociada con la falta de cumplimiento de Buenas Prácticas de Manufactura se encontró en preparados tanto de inicio como de continuación en el 16,7% y 75%, respectivamente. *Pseudomonas* sp. se encontró en el 8,3% de las muestras de inicio. Los resultados indican la necesidad de reforzar el control de calidad y la aplicación de las Buenas Prácticas de Manufactura de los preparados infantiles que se elaboran en el país, en especial de los de continuación, dado que, en algunos de ellos, microorganismos patógenos fueron aislados, constituyendo un riesgo potencial de infección para los infantes.

Palabras clave: preparados infantiles en polvo, leche de fórmula, calidad microbiológica, enfermedades transmitidas por alimentos, patógenos de transmisión alimentaria

INTRODUCCIÓN

La alimentación con leche materna es ideal para el crecimiento y desarrollo adecuado de lactantes y niños pequeños. Se ha reportado que provee muchos beneficios a nivel cognoscitivo, sensorial y de protección contra enfermedades infecciosas [1]. La Organización Mundial de la Salud recomienda que sea exclusiva durante los 6 primeros meses de vida y que se continúe hasta los dos años o más [2]. Sin embargo, esta práctica milenaria es cada vez menos frecuente, ya sea por enfermedad de la madre, por la creciente participación de las mujeres en diversas áreas laborales, las pocas facilidades para dar de lactar en áreas públicas o los anuncios comerciales que presentan a los preparados en polvo como alimentos completos que pueden sustituir a la leche materna [3,4]. El Instituto Nacional de Estadísticas y Censos del Ecuador, analizó la prevalencia de la lactancia materna exclusiva en niños ecuatorianos menores de 2 años, indicando que el 72,7% recibieron leche materna en la primera hora de



vida y que mientras aumenta el nivel de instrucción de la madre, el porcentaje de lactancia materna exclusiva disminuye [5].

Existen en el mercado varios tipos de preparados en polvo de origen lácteo y no lácteo, formulados para cubrir las necesidades nutricionales de lactantes en etapas críticas de crecimiento y desarrollo [6]. Según el grupo al que van dirigidos pueden ser de inicio, para lactantes de 0 a seis meses, o de continuación para niños de seis a 12 meses y se diferencian por su composición nutricional [7,8]. Estos productos se elaboran mediante procesos de mezcla de varios ingredientes como: leche en polvo, concentrados de proteína de soja, hidratos de carbono, grasas, vitaminas, minerales y algunos aditivos alimentarios según los lineamientos establecidos en el Código de Prácticas de Higiene para Alimentos con Bajo contenido de Humedad CXC 75-2015 [9]. Todos los ingredientes deben estar limpios, ser de buena calidad e inocuos [10]. En su proceso de elaboración es necesario que se cumpla rigurosamente las buenas prácticas de higiene para garantizar la inocuidad del producto [11], y deberán ajustarse a los criterios microbiológicos relativos a los alimentos.

La contaminación microbiana de estos preparados puede ser causa de infecciones y enfermedades en lactantes y niños pequeños, resultando en graves secuelas en su desarrollo e incluso la muerte [12]. Por ejemplo, en España en 2008, se determinó que leche de fórmula contaminada con *Salmonella* serotipo Kedougou, provocó diarrea y fiebre en 31 niños menores a un año, 10 de ellos necesitaron hospitalización [13]. *Cronobacter sakazakii* también ha sido implicado en brotes, como el caso de Bélgica, donde preparados infantiles utilizados en la unidad de cuidados intensivos neonatales de un hospital, estaban contaminados con este microorganismo provocando que 12 neonatos desarrollen colitis necrotizante, de los cuales dos de ellos fallecieron [14].

En el Ecuador, la Agencia Nacional de Regulación, Control y Vigilancia Sanitaria (ARCSA), es la entidad reguladora encargada del control post registro de muchos productos, entre ellos, los preparados infantiles en polvo. El control se hace a través de un análisis microbiológico, donde se comprueba la calidad y seguridad de los productos importados y/o cuando se hayan presentado alertas sanitarias por contaminación microbiana [15].

En el año 2017, en base al informe presentado por la Red Internacional de Autoridades de Seguridad Alimentaria (INFOSAN, por sus siglas en inglés), la ARCSA, puso en alerta a los establecimientos encargados de la importación y comercialización de preparados infantiles en polvo debido a la contaminación con *Salmonella* de marcas francesas comercializadas en Perú y Colombia, las cuales fueron retiradas del mercado [16]. En el año 2019, una nueva alerta por la contaminación de productos infantiles con *Salmonella*, ahora de una marca que se importaba y comercializaba en farmacias y supermercados de Ecuador, condujo a un retiro del producto en el mercado por el alto riesgo que supone la presencia de este patógeno [17].

Debido a estas alertas sanitarias y a la escasa investigación sobre la inocuidad de estos productos en el país, este estudio tuvo por objetivo el análisis de muestras de preparados infantiles comercializados en la ciudad de Quito, en base al cumplimiento de los criterios microbiológicos descritos en las normas del Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN), NTE INEN 707 (2013) para preparados de inicio (para lactantes



de 0 a seis meses) y NTE INEN 2516 (2010) para preparados de continuación (para lactantes de seis a 12 meses) [18, 19]. Los análisis realizados en las muestras fueron el conteo de microorganismos aerobios y de enterobacterias. También se investigó la presencia de bacterias responsables de enfermedades transmitidas por alimentos (ETA) como *Salmonella*, *Staphylococcus aureus*, *Bacillus cereus* y *Hafnia alvei*. Se analizaron las muestras para buscar la presencia de indicadores de calidad como *Escherichia coli* y de otros microorganismos que pudieran indicar falta de aplicación de Buenas Prácticas de Manufactura (BPM), higiene deficiente o un inadecuado tratamiento térmico. Los datos generados son de utilidad para determinar la inocuidad y calidad microbiológica de estos productos destinados a un grupo poblacional sensible.

MATERIALES Y MÉTODOS

Diseño del estudio y muestra

Este fue un estudio observacional, descriptivo y transversal. De acuerdo con la división geográfica de la ciudad se seleccionaron de forma no aleatoria supermercados, tiendas y farmacias del norte, centro y sur de Quito, donde se adquirieron los productos a disponibilidad de los establecimientos comerciales. En total se obtuvieron 24 preparados infantiles en polvo de 8 diferentes marcas: 12 preparados de inicio (para lactantes de 0 a seis meses) todos importados y 12 preparados de continuación (para niños de seis a 12 meses) de los cuales 3 fueron importados y 9 de fabricación local. El precio en el mercado estaba en un rango de US\$ 4 a 25. El periodo de ejecución del estudio fue del 11 de marzo al 5 de septiembre de 2019.

Las muestras adquiridas contaban con registro o notificación sanitaria, estaban dentro del periodo de vida útil y sus envases primarios no presentaban irregularidades ni alteraciones. Fueron transportadas al laboratorio de Microbiología General y Farmacéutica de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Central del Ecuador, donde se procesaron en un máximo de cuatro horas después de haber sido adquiridas.

Contaje de microorganismos en los preparados infantiles en polvo

Se siguió la metodología descrita en la norma AOAC 990.12 (2002) para el conteo de microorganismos aerobios [20]. Brevemente, se tomaron 10 gramos de cada producto y se disolvieron en 90 ml de diluyente tamponado de fosfato de Butterfield estéril a pH 7,2 (dilución 10^{-1}); para las diluciones 10^{-2} y 10^{-3} , se tomaron 10 ml de la dilución anterior y se colocaron en 90 ml del diluyente estéril. Se inoculó 1 ml de cada dilución en placas Petrifilm (por duplicado) para recuento de aerobios y se dejaron reposar por 3 minutos a temperatura ambiente, antes de ser incubadas a 37 °C en una incubadora IncuCell de MMM durante 48 horas. Para el recuento de enterobacterias se siguió la metodología descrita en la norma AOAC 2003.01 (2006), donde las placas Petrifilm para enterobacterias fueron inoculadas con las diluciones y se incubaron durante 24 horas a 37 °C [21]. El procesamiento de las muestras se llevó a cabo en una cabina de bioseguridad. Después del tiempo de incubación, se cuantificaron las colonias para el cálculo de unidades formadoras de colonia por gramo de muestra (UFC/g) [22].



Aislamiento e identificación de microorganismos

Diluciones de las muestras se sembraron en agar Manitol-Yema de Huevo-Polimixina para la identificación de especies de *Bacillus*, en Manitol Salado para especies de *Staphylococcus* y en agar Cetrimida para *Pseudomonas* spp. La confirmación de géneros y especies se hizo a través de pruebas bioquímicas específicas, según el tipo de microorganismo aislado en caja [23-25]. Todos los medios de cultivo utilizados en este estudio fueron de BD, Maryland, Estados Unidos.

Para *Salmonella*, se siguió la metodología de la norma ISO 6579-1: (2017), para el pre enriquecimiento se disolvieron 25 gramos de muestra en 225 ml de agua peptonada tamponada y se incubó de 16 a 20 horas a 37 °C. Se inoculó 1 ml de muestra pre-enriquecida en 10 ml de caldo Rappaport Vassiliadis y se incubó a 42 °C durante 24 horas. Después del tiempo de incubación, las muestras que presentaron turbidez o cambio de coloración del medio se sembraron por estriación en agar Xilosa Lisina Desoxicolato (XLD) que se incubó durante 24 horas a 37 °C. Colonias características, se aislaron en agar Tripticasa Soya (TSA) y se realizaron las pruebas bioquímicas en los medios: Triple Azúcar Hierro Agar (TSI), Lisina Hierro Agar (LIA), Urea, y Motilidad Indol Ornitina Agar (MIO) [26].

Para identificar las enterobacterias presentes en las muestras, se hizo un enriquecimiento selectivo, para lo cual se siguió la metodología de la Administración de Alimentos y Medicamentos de Estados Unidos (FDA, por sus siglas en inglés). Se incorporaron 10 g de muestra en 90 ml de agua peptonada tamponada y se incubó durante 24 horas a 37 °C. Un mililitro se colocó en 9 ml de caldo de Enriquecimiento de Enterobacterias (EE) de Mossel y se incubó a 37 °C durante 24 horas. Después del tiempo de incubación, las muestras que presentaron turbidez o cambio de coloración del medio se sembraron por duplicado en agar Violeta Rojo Bilis Glucosa (VRBG) y se incubaron durante 24 horas a 37 °C. Las colonias características, se aislaron en agar TSA y se realizaron las pruebas bioquímicas correspondientes [27].

Identificación de especies de enterobacterias con el Kit Microgen GN-ID A

Según la metodología descrita por Microgen Bioproducts Ltd (2007), se suspendió una colonia de un bacilo Gram negativo/oxidasa negativo de un cultivo de TSA de 24 horas, en 3 ml de solución salina estéril al 0,9%. Se inoculó cada pocillo del kit con 100 uL de la suspensión bacteriana y se incubó por 24 horas a 37 °C. Después del tiempo de incubación, se realizó la lectura e interpretación de los resultados. En la base de datos del programa Microgen ID Software Registration, se ingresó la asignación numérica, para obtener el género y especie del microorganismo ensayado [28].

Criterios microbiológicos según las normas vigentes

Acorde con la norma técnica ecuatoriana INEN 707 (2013), los preparados infantiles de inicio pueden tener contajes iguales o menores a 500 UFC/g para microorganismos aerobios y ausencia de enterobacterias en 10 gramos de muestra. Para los preparados de continuación los valores de microorganismos aerobios deben ser iguales o menores a 10³ UFC/g y ausencia en 10 gramos para enterobacterias según la norma técnica ecuatoriana



INEN 2516 (2010). En este estudio no se consideró el valor de < 3 para enterobacterias de la norma, sino ausencia en 10 gramos al igual que en la INEN 707, debido a que es coherente con el método analítico empleado. Ninguno de los preparados tanto de inicio como de continuación debe tener *Salmonella* spp. en 25 gramos, ni *Cronobacter sakazakii* en 10 gramos [18, 19]. Dado que se analizó una muestra de cada lote y marca, se tomó en cuenta el valor de m de los requisitos microbiológicos de las normas y no el de M , debido al n menor. Siendo n el número de muestras a analizar por lote, m el valor que separa la calidad microbiológica buena de la marginal y M el valor de recuento microbiano por encima del cual las muestras son inaceptables.

Análisis de datos

El análisis de este estudio fue descriptivo. Los contajes de microorganismos fueron comparados con las normas INEN 707 (2013) e INEN 2516 (2010) para saber qué productos cumplían o no con los parámetros establecidos en las mismas [18, 19]. Los porcentajes de muestras con presencia de un determinado microorganismo, fueron obtenidos relacionando el número de muestras donde hubo el aislamiento, sobre el total de muestras analizadas.

RESULTADOS

Todos los preparados de inicio analizados fueron importados y el 100% cumplieron con el recuento de microorganismos aerobios, al presentar valores menores a 500 UFC/g y al no contener enterobacterias en 10 gramos de producto analizado. De los 12 preparados de continuación, 3 eran importados y cumplieron los valores tanto para aerobios ($\leq 10^3$ UFC/g) como para enterobacterias (ausencia/10g). De los 9 productos restantes, de fabricación nacional, 6 no cumplieron, ya que presentaron valores de aerobios de entre $1,2 \times 10^4$ y $2,8 \times 10^4$ UFC/g y valores de entre 2×10^1 y $1,2 \times 10^2$ UFC/g para enterobacterias (Tabla 1). No hubo presencia de *Salmonella* spp. ni *Staphylococcus aureus* en ninguno de los preparados analizados. Sin embargo, patógenos de alimentos como *Bacillus cereus* se aisló en el 25% y *Hafnia alvei* en el 16,7% de preparados de continuación.

La determinación de enterobacterias como indicadores de prácticas de higiene, mostró en los productos de inicio a *Klebsiella oxytoca* (41,7%), seguida de *Pantoea agglomerans* y *Citrobacter freundii* en igual porcentaje (25%). En el caso de las fórmulas de continuación se aisló *Klebsiella oxytoca* y *Enterobacter aerogenes* (cada una en un 25%) y *Escherichia coli* al igual que *Pantoea agglomerans* en el 8,3% de muestras (Fig. 1).

Otros microorganismos que pueden estar relacionados con fallas en los procesos de elaboración y almacenamiento también se identificaron, *Bacillus subtilis* se aisló en el 16,7% de fórmulas de inicio y en el 75% de continuación. *Pseudomonas* sp. se identificó solamente en los preparados de inicio en un 8,3% (Fig. 1).

TABLA 1. Recuento de microorganismos aerobios y de enterobacterias en los preparados infantiles analizados (Los autores)

Preparados infantiles de inicio †			Preparados infantiles de continuación ‡		
Valores de referencia (NTE INEN 707 y 2516)	Recuento de microorganismos aerobios	Recuento de enterobacterias		Recuento de microorganismos aerobios	Recuento de enterobacterias
	≤ 500 UFC/g	Ausencia/10 g		≤ 10 ³ UFC/g	Ausencia/10 g
	(UFC/g)	(UFC/10 g)		(UFC/g)	(UFC/10g)
Muestra 1	<10	Ausencia	Muestra 13*	2,8 x 10 ⁴	2,0 x 10 ¹
Muestra 2	<10	Ausencia	Muestra 14*	2,5 x 10 ⁴	2,0 x 10 ¹
Muestra 3	<10	Ausencia	Muestra 15*	2,7 x 10 ⁴	3,0 x 10 ¹
Muestra 4	<10	Ausencia	Muestra 16	<10	Ausencia
Muestra 5	<10	Ausencia	Muestra 17	<10	Ausencia
Muestra 6	<10	Ausencia	Muestra 18	<10	Ausencia
Muestra 7	<10	Ausencia	Muestra 19*	1,2 x 10 ⁴	1,2 x 10 ²
Muestra 8	<10	Ausencia	Muestra 20*	1,4 x 10 ⁴	3,0 x 10 ¹
Muestra 9	<10	Ausencia	Muestra 21*	1,4 x 10 ⁴	4,0 x 10 ¹
Muestra 10	<10	Ausencia	Muestra 22*	<10	Ausencia
Muestra 11	<10	Ausencia	Muestra 23*	<10	Ausencia
Muestra 12	<10	Ausencia	Muestra 24*	<10	Ausencia

En negrita se detallan las muestras que incumplieron el recuento de aerobios y el de enterobacterias. * Muestras que fueron de fabricación local.

† norma INEN 707. ‡ norma INEN 2516.

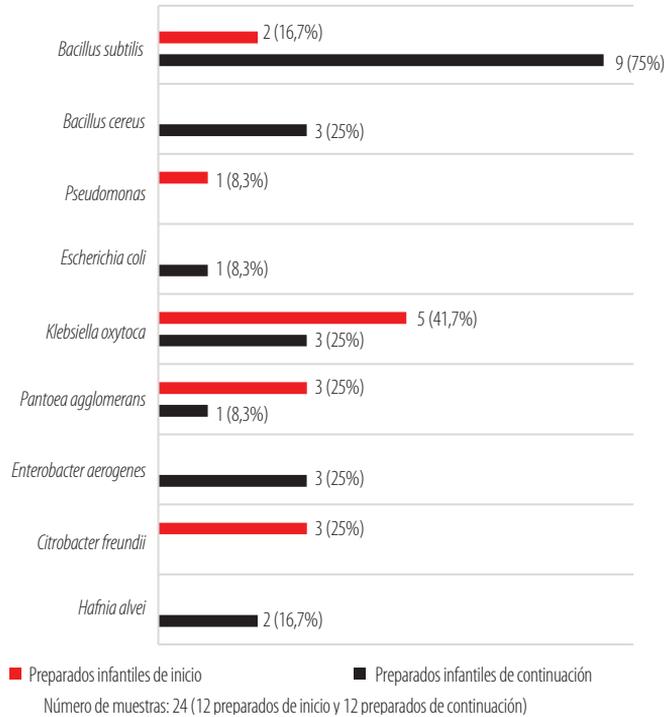


FIGURA 1. Especies de microorganismos identificados en los preparados infantiles analizados (Los autores)

DISCUSIÓN

Los preparados infantiles en polvo son alimentos procesados empleados con frecuencia en la alimentación de lactantes y niños pequeños, y como tales, deben cumplir con criterios microbiológicos que aseguren su calidad e inocuidad. En este estudio, se analizó la calidad microbiológica de 24 preparados infantiles en polvo, empleando métodos reconocidos para el conteo e identificación de los microorganismos que pudieran estar presentes en estos productos.

De acuerdo con las normas INEN vigentes en el Ecuador que se aplican a estos productos INEN 707 (2013) e INEN 2516 (2010) [18,19], el 100% de los preparados de inicio cumplieron con los criterios microbiológicos de recuento de microorganismos aerobios y de enterobacterias. Sin embargo, el 50% de preparados infantiles de continuación sobrepasaron los valores establecidos tanto para aerobios como para enterobacterias considerados indicadores de calidad. Los valores de microorganismos aerobios aumentados no necesariamente implican un riesgo para el consumidor, sino que pueden estar relacionados con el incumplimiento de BPM en las plantas de fabricación, inadecuadas condiciones de almacenamiento, elaboración, distribución y transporte de materias primas, aditivos, productos intermedios y del producto terminado [29]. En



el caso de recuentos aumentados de enterobacterias, estarían indicando prácticas de higiene deficientes o fallas de procesamiento, que podrían llegar a afectar la calidad y seguridad del alimento.

Al considerar lo que indica el Código de Prácticas de Higiene para los Preparados en Polvo para Lactantes y Niños Pequeños (CAC/RCP 66 2008) del Codex Alimentarius [11], “la fabricación inocua de estos productos depende del mantenimiento de un alto nivel de control sobre la higiene. Los criterios microbiológicos (...) están destinados a que los utilice el fabricante como medio de evaluación permanente de sus programas de higiene”, por lo que en el caso de este estudio, la presencia de enterobacterias en este tipo de preparados, constituye una alerta sobre las condiciones en las que se están elaborando los productos.

Un estudio en Chile reportó que el 11% de marcas analizadas sobrepasaron los niveles permitidos de aerobios, presentando recuentos de entre 1×10^3 y 5×10^3 UFC/g, mientras que los recuentos de enterobacterias fueron mayores a los de esta investigación y se encontraban entre $5,0 \times 10^2$ y $7,9 \times 10^2$ UFC/g en el 55% de las muestras [30]. En un estudio en Malasia, en que se analizó el contaje de aerobios, el 33,3% de las muestras de continuación y el 10% de los preparados de inicio, presentaron cantidades superiores a 10^4 UFC/g [31]. Estos datos indican que contajes elevados en este tipo de productos no son eventos aislados.

Uno de objetivos de esta investigación, fue detectar la presencia de indicadores de inocuidad en los productos. *Salmonella* se considera uno de los patógenos alimentarios más importante en alimentos procesados o derivados de lácteos y causante de ETA. Este microorganismo no se encontró en ninguna de las muestras analizadas, lo que coincide con el estudio de Heperkan, Dalkilic-Kaya, y Juneja en 2016 [32]. Por otro lado, Maçi et al. (2015) analizaron 70 muestras de farmacias, hospitales, supermercados y tiendas de comestibles en Albania y encontraron el 1,4% de preparados infantiles en polvo contaminados con *Salmonella* [33]. Infecciones asociadas al consumo de preparados infantiles contaminados con esta bacteria, se han reportado en muchos países [34, 35].

Otro patógeno responsable de ETA que tampoco se aisló de las muestras fue *S. aureus*, sin embargo, un estudio en China reportó su presencia en el 11,2% de productos y se identificaron genes productores de toxinas en muchas de las cepas aisladas [36].

Un patógeno oportunista transmitido por alimentos que se encontró fue *Bacillus cereus* en los preparados de continuación, este microorganismo formador de endosporas, puede resistir diversas condiciones de estrés, entre ellas, la pasteurización o UHT de la leche [37, 38]. También puede permanecer viable por largos periodos de tiempo en alimentos con actividad de agua (a_w) por debajo de 0,85 [9], como los preparados infantiles en polvo cuya a_w está entre 0,25 a 0,5 [39]. Una vez que las condiciones son favorables, las bacterias germinan y producen las enterotoxinas responsables de emesis y diarrea, lo que se ha observado en neonatos y pacientes con catéteres permanentes [40]. En China, encontraron que el 7,5% de los preparados infantiles tuvieron contajes ≥ 10 UFC/g y el 1,1% valores superiores a 100 UFC/g de *B. cereus* que se cree ha causado brotes en niños e infantes en ese país [41].



También en China, se evaluaron 880 muestras entre materias primas, equipos, personal y productos terminados de una empresa encargada de la manufactura de preparados infantiles, y se identificó *B. cereus* en el 22,7% de los productos terminados [42].

Hafnia alvei presente solo en preparados de continuación, puede considerarse un patógeno intestinal productor de toxinas citolíticas responsables de gastroenteritis [43]. Esta bacteria forma parte de la microbiota natural de la leche [44], y tiene la capacidad de formar biofilms en equipos y materiales utilizados en la industria de alimentos de manera que una adecuada desinfección y limpieza de estos, es fundamental [45].

Además en este estudio se determinó, cuáles eran los géneros de enterobacterias presentes en las muestras que son indicadores de la calidad e higiene de un alimento, y muchas de ellas pueden causar trastornos gastrointestinales, enterocolitis necrosante e infecciones sistémicas, enfermedades que han sido reportadas en niños menores de un año, siendo los bebés inmunocomprometidos o debilitados médicamente los más susceptibles [12]. Además, según se indica en el Código de Prácticas de Higiene para Alimentos con Bajo Contenido de Humedad CXC 75-2015, cuando se detectan patógenos como *Salmonella* o microorganismos indicadores de la higiene de los procesos, como las enterobacterias en el ambiente de la instalación del establecimiento y sus niveles superan el "criterio de decisión", deberían tomarse medidas adecuadas para investigar la fuente de contaminación y eliminar o controlar los microorganismos presentes en el ambiente [9].

E. coli se identificó en uno de los preparados de continuación. Esta enterobacteria es un indicador de contaminación fecal. Su presencia en un alimento está asociada a la posibilidad de encontrar patógenos intestinales, de manera que un alimento contaminado con esta bacteria, no es apto para consumo. En un estudio similar, los investigadores reportaron 14% de fórmulas infantiles contaminadas con este bacilo Gram negativo [46].

Klebsiella oxytoca fue la enterobacteria aislada en mayor porcentaje en las muestras de inicio (41,7%), y también estuvo en los productos de continuación, aunque en menor porcentaje (25%). Este microorganismo está relacionado con contaminación ambiental y ha sido identificado en plantas y en el suelo de granjas lecheras [47]. Otros estudios también la han reportado en preparados infantiles en Nigeria y China [48, 49].

Otra enterobacteria aislada tanto en muestras de inicio como de continuación, fue *Pantoea agglomerans*. Aunque este microorganismo no se considera un patógeno que se transmite por alimentos, si ha sido implicado en sepsis por trauma o por uso de catéteres en pacientes hospitalizados [50]. En un estudio realizado en Irán se la identificó en 6,4% de preparados infantiles en polvo dispensados en farmacias de hospitales, los autores indican que la presencia de esta enterobacteria podría estar relacionada con ingredientes contaminados que son añadidos después de la etapa de secado y antes del envasado de estos productos [51]. En Ecuador, Carvajal (2013) analizó preparados infantiles en polvo utilizados en un Hospital Público de la ciudad de Guayaquil y reportó que en el 20,9% de muestras se identificaron especies de enterobacterias como *Pantoea* spp. y *Enterobacter cloacae* [52].



Enterobacter aerogenes aislado en productos de continuación, no se transmite por alimentos, pero es uno de los patógenos nosocomiales con amplia resistencia antimicrobiana [53].

También se aisló en preparados de inicio a *Citrobacter freundii*, que, si bien se considera un comensal del intestino de humanos y animales, hay datos que demuestran que puede causar enfermedades diarreicas por medio de la producción de toxinas [54]. Estos bacilos Gram negativos también fueron identificados en 6 de 75 preparados infantiles en Italia [55].

Microorganismos indicadores de fallas en la aplicación de Buenas Prácticas de Manufactura también se aislaron, por ejemplo, *Pseudomonas* spp. en el 8,3% de las muestras de inicio. Este microorganismo tiende a formar biofilms y su presencia puede deberse a sistemas inapropiados para la distribución y almacenamiento del agua para uso en la industria [56]. Se ha descrito que comprende entre el 70 al 90% de bacterias que están presentes en la leche cruda y puede desarrollarse a temperaturas inferiores a 7 °C, condición estándar de almacenamiento antes de ser pasteurizada en las industrias. Su presencia en los preparados infantiles en polvo, puede indicar que las condiciones de refrigeración que permiten controlar la carga bacteriana en la leche de vaca, han creado un medio óptimo de crecimiento para *Pseudomonas* spp. y que probablemente el proceso de tratamiento térmico es ineficiente [57]. Dogan y Boor (2003), aislaron 338 cepas de *Pseudomonas* spp. a partir de muestras de leche cruda, pasteurizada y del ambiente de 4 plantas de producción lechera [58]. Avellan y Parra (2019) analizaron preparados infantiles comercializados por distribuidoras y farmacias de un importante sector comercial de Guayaquil-Ecuador, encontrando *Pseudomonas* spp. en el 3% de las muestras [59].

Bacillus subtilis se identificó tanto en fórmulas de inicio como de continuación. Este microorganismo no es un enteropatógeno, pero está ampliamente distribuido en la naturaleza y puede contaminar la materia prima y el ambiente, además por su capacidad de formar biofilms puede ser persistente en los sistemas de agua de las industrias [60].

Una de las limitaciones de este estudio fue que no se analizó la presencia de *Cronobacter sakazakii*, debido a que no fue posible acceder a técnicas cromogénicas y moleculares como lo establece el protocolo de la FDA [61]. Este patógeno es causante de múltiples infecciones en lactantes y niños pequeños, particularmente en neonatos cuya muerte puede ocurrir en 40 – 80% de los casos y que ha estado implicado en casos de meningitis y septicemia [62]. Otra limitación fue que los resultados son exclusivamente aplicables a los productos y marcas analizadas, debido a que la selección de las muestras no fue aleatoria, por lo que es difícil la generalización de estos resultados a estos u otros productos y marcas.

En esta investigación a más del conteo de enterobacterias según las normas de la AOAC, también se sometió a las muestras a un proceso de pre-enriquecimiento selectivo para bacilos Gram negativos, aun cuando esto no consta en las Normas INEN. Se consiguió detectar enterobacterias inclusive en los preparados de inicio, donde los recuentos para estos microorganismos fueron negativos, esto se considera una de las fortalezas de este estudio. Estos resultados indican que estas bacterias están presentes y que puede ser necesario que las normas incluyan el pre-enriquecimiento como un mecanismo válido para asegurar su correcto aislamiento e identificación. Otra



fortaleza es que se hizo el análisis de una variedad de preparados infantiles según el grupo de edad, nacionales e importados, que se comercializan en Quito. Igualmente, los métodos de contaje e identificación que se aplicaron en este estudio constan en las normas vigentes en el país y fueron previamente validados.

CONCLUSIÓN

Los resultados generados en este estudio muestran la necesidad de reforzar el control de calidad y de la aplicación de las Buenas Prácticas de Manufactura de los preparados infantiles que se comercializan en el país, en especial de los preparados de continuación donde el 50% presentaron contajes de microorganismos aerobios superiores a 10^3 UFC/g y presencia de enterobacterias, todos correspondientes a muestras de fabricación nacional. El aislamiento de enteropatógenos como *B. cereus* y *Hafnia alvei* constituye riesgo para los consumidores y la presencia de *E. coli* y otras enterobacterias implica la necesidad de reforzar la higiene y vigilancia del cumplimiento de BPM.

En esta investigación aplicamos un pre-enriquecimiento para aislar enterobacterias, aun cuando no está estipulado en la metodología recomendada en las normas, lo que podría indicar la necesidad de incluir este procedimiento en el análisis microbiológico y así asegurar la inocuidad y seguridad de estos preparados en polvo.

AGRADECIMIENTOS

A la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Central del Ecuador, laboratorio de Microbiología General y Farmacéutica, donde se realizó el estudio. Esta investigación fue en su mayor parte financiada por los autores.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Kimberly Carrión y Rommy Terán, han participado en la concepción de la investigación y diseño del estudio; Kimberly Carrión realizó los análisis microbiológicos; Kimberly Carrión, Lorena Goetschel y Rommy Terán analizaron e interpretaron los datos; Kimberly Carrión, Lorena Goetschel y Rommy Terán redactaron el manuscrito; Lorena Goetschel y Rommy Terán revisaron críticamente el contenido intelectual del manuscrito.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener conflicto de intereses en relación a la publicación de este artículo.

REFERENCIAS

- [1] Brahm, P., & Valdés, V. (2017). Beneficios de la lactancia materna y riesgos de no mamantar. *Revista Chilena de Pediatría*, 88(1), 15-21. doi: <http://dx.doi.org/10.4067/S0370-41062017000100001>
- [2] Organización Mundial de la Salud. (2017). *Metas Mundiales de Nutrición 2025: Documento Normativo Sobre Lactancia Materna [Global Nutrition Targets 2025: Breastfeeding]*. Recuperado de <https://bit.ly/3ymq5xq>
- [3] Freire, W. B., Ramírez-Luzuriaga, M. J., Belmont, P., Mendieta, M. J., Silva-Jaramillo, K., Romero, N., Sáenz, K., Piñeros, P., Gómez, L. F., & Monge, R. (2014). *Tomo I: Encuesta Nacional de Salud y Nutrición de La Población de Cero a 59 Años ENSANUT- ECU 2012*. Ministerio de Salud Pública/Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. Quito-Ecuador.
- [4] Organización Mundial de la Salud, & Organización Panamericana de la Salud. (2016). La Lactancia Materna En El Siglo XXI. *The Lancet* 1-8. Recuperado de <https://www.paho.org/hq/dmdocuments/2016/LactanciaMaternaEnSigloXXI-Abril15.pdf>
- [5] Serrano, M., Pozo, M., Medina, D., Viteri, J. J., & Lombeida, E. (2019). *Boletín Técnico: Encuesta Nacional de Salud y Nutrición, 2018 Indicadores de Salud y Nutrición de La Población Ecuatoriana*. Recuperado de https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas_Sociales/ENSANUT/ENSANUT_2018/Boletin ENSANUT 28_12.pdf
- [6] Hernández, V. (2011). Fórmulas Infantiles. *Revista Gastrohnp*, 13(2), 531-536. Recuperado de <http://revgastrohnp.univalle.edu.co/a11v13n2s1/a11v13n2s1art5.pdf>
- [7] Dalmau Serra, J., Ferrer Lorente, B., & Vitoria Miñana, I. (2015). Lactancia artificial. *Pediatría Integral*, 19(4), 251-259. Recuperado de https://www.pediatriaintegral.es/wp-content/uploads/2015/xix04/03/n4-251-259_Jaime%20Dalmau.pdf
- [8] Ferrer Lorent, B., & Dalmau Serra, J. (2005). Fórmulas de continuación y fórmulas de crecimiento. *Acta Pediátrica Española*, 63, 471-475. Recuperado de <https://bit.ly/3Dszejv>
- [9] Organización Mundial de la Salud, & Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2018). *Código de prácticas de higiene para alimentos con bajo contenido de humedad CXC 75-2015*. Recuperado de <https://bit.ly/3jr5eET>
- [10] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, & Organización Mundial de la Salud. (2017). *Norma para alimentos envasados para lactantes y niños CODEX STAN 73-1981*. Recuperado de <https://bit.ly/3sYnIW7>
- [11] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, & Organización Mundial de Salud. (2008). *CAC/RCP 66 - 2008 Código de Prácticas de Higiene Para Los Preparados En Polvo Para Lactantes y Niños Pequeños*. Recuperado de <https://bit.ly/3BpmDnw>
- [12] Food and Agriculture Organization of the United Nation, & World Health Organization. (2004). *Enterobacter sakazakii and other microorganisms in powdered infant formula*. Recuperado de <http://www.fao.org/3/y5502e/y5502e.pdf>
- [13] Rodríguez-Urrego, J., Herrera-León, S., Echeita-Sarriondia, A., Soler, P., Simon, F., Mateo, S., & Investigation team. (2010). Nationwide Outbreak of *Salmonella* Serotype Kedougou Associated with Infant Formula, Spain, 2008. *Eurosurveillance*, 15(22), 1-5. doi: <https://doi.org/10.2807/ese.15.22.19582-en>
- [14] Van Acker, J., De Smet, F., Muyldermans, G., Bougatef, A., Naessens, A., & Lauwers, S. (2001). Outbreak of Necrotizing Enterocolitis Associated with *Enterobacter sakazakii* in Powdered Milk Formula. *Journal of Clinical Microbiology*, 39(1), 293-297. doi: <https://doi.org/10.1128/JCM.39.1.293-297.2001>
- [15] Agencia Nacional de Regulación, Control y Vigilancia Sanitaria. (2017b). *Normativa Técnica Sanitaria Para Alimentos Procesados*. Recuperado de https://www.controlsanitario.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/03/ARCSA-DE-067-2015-GGG_Alimentos-Procesados_incluye-RESOL-019-y-010-2.pdf
- [16] Agencia Nacional de Regulación, Control y Vigilancia Sanitaria. (2017a). *Arcsa informa sobre fórmulas lácteas infantiles contaminadas con Salmonella*. Recuperado de <https://bit.ly/3gHIEqW>
- [17] Agencia Nacional de Regulación, Control y Vigilancia Sanitaria. (2019). Actualización N° 2 | alerta sanitaria sobre lote 2958-004 de producto fórmula infantil Blemil Plus 2 arroz – 400 g contaminado con *Salmonella*. Recuperado de <https://bit.ly/2XYJB6A>



- [18] Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2013). *Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 707:2013 Preparados de inicio para la alimentación de lactantes. Requisitos*. Quito. Recuperado de https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/nte_inen_707-3.pdf
- [19] Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2010). *Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2516:2010 Preparados de continuación para la alimentación de lactantes. Requisitos*. Quito. Recuperado de <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/2516.pdf>
- [20] Association of Official Analytical Chemists. (2002). *AOAC Official Method 990.12 Aerobic Plate Count in Foods*. Recuperado de https://www.edgeanalytical.com/wp-content/uploads/Food_AOAC-990.12.pdf
- [21] Association of Official Analytical Chemists. (2006). *Official Method 2003.01 Enumeration of Enterobacteriaceae in Selected Foods*. Recuperado de <https://multimedia.3m.com/mws/media/17599290/aoac-oma-2003-01-enumeration-of-enterobacteriaceae-in-foods.pdf>
- [22] Tortorello, M. L. (2003). Indicator organisms for safety and quality—Uses and methods for detection: Minireview. *Journal of AOAC INTERNATIONAL*, 86(6), 1208-1217. doi: <https://doi.org/10.1093/jaoac/86.6.1208>
- [23] Tallent, S., Knolhoff A., Rhodehamel J., Bennett R., & Harmon S. (2020). BAM Chapter 14: *Bacillus cereus* | FDA. Recuperado de <https://bit.ly/3jt5spc>
- [24] Tallent, S., Hait J., Bennett R., & Lancette G. (2019). BAM Chapter 12: *Staphylococcus aureus* | FDA. Recuperado de <https://bit.ly/38lqoxU>
- [25] Merck KGaA. (2010). *Microbiology Manual*. Darmstadt. Recuperado de http://www.laboquimia.es/pdf_catalogo/MERCK_Manual_de_microbiologia_12a_edicion.pdf
- [26] International Organization for Standardization. (2017). *ISO 6579-1:2017 Microbiology of the Food Chain—Horizontal Method for the Detection, Enumeration and Serotyping of Salmonella - Part 1: Detection of Salmonella spp.* Recuperado de <https://www.triphuc.com/wp-content/uploads/2019/10/ISO-6579-1-2017.pdf>
- [27] U.S. Food & Drug Administration. (2002). Laboratory methods - Isolation and Enumeration of *Enterobacter sakazakii* from dehydrated powdered infant formula. Recuperado de <https://bit.ly/38mMjEX>
- [28] Microgen Bioproducts Ltd. (2007). *Microgen Gna+B-ID*. Recuperado de <http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/12143/MICROGEN-GN-ID-MID64-641-65.%5B2%5D.pdf>
- [29] Aycicek, H., Oguz, U., & Karci, K. (2006). Determination of Total Aerobic and Indicator Bacteria on some raw eaten vegetables from wholesalers in Ankara, Turkey. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 209(2), 197-201. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2005.07.006>
- [30] Parra-Flores, J., Cerda-Leal, F., Contreras, A., Valenzuela-Riffo, N., Rodríguez, A., & Aguirre, J. (2018). *Cronobacter sakazakii* and microbiological parameters in dairy formulas associated with a food alert in Chile. *Frontiers in Microbiology*, 9, 1-9. doi: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.01708>
- [31] Abdullah Sani, N., Hartantyo, S. H. P., & Forsythe, S. J. (2013). Microbiological assessment and evaluation of rehydration instructions on powdered infant formulas, follow-up formulas, and infant foods in Malaysia. *Journal of Dairy Science*, 96(1), 1-8. doi: <https://doi.org/10.3168/jds.2012-5409>
- [32] Heperkan, D., Dalkilic-Kaya, G., & Juneja, V. (2016). *Cronobacter sakazakii* in baby foods and baby food ingredients of dairy origin and microbiological profile of positive samples. *LWT - Food Science and Technology*, 75, 402-407. doi: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.09.013>
- [33] Maçi, R., Bijo, B., Xinxo, A., Shehu, F., & Memoçi, H. (2015). Prevalence of *Salmonella* spp. in imported powdered infant formula (PIF). *Albanian Journal of Agricultural Sciences*, 14(3), 236-240. Recuperado de <https://bit.ly/3ywGnUu>
- [34] Cahill, S. M., Wachsmuth, I. K., Costarrica, M. L., & Embarek, P. K. B. (2008). Powdered Infant Formula as a Source of *Salmonella* Infection in Infants. *Clinical Infectious Diseases*, 46(2), 268-273. doi: <https://doi.org/10.1086/524737>
- [35] Park, J. K., Seok, W. S., Choi, B. J., Kim, H. M., Lim, B. K., Yoon, S. S., Kim, S., Kim, Y. S., & Park, J. Y. (2004). *Salmonella enterica* Serovar London Infections Associated with Consumption of Infant Formula. *Yonsei Medical Journal*, 45(1), 43-48. doi: <https://doi.org/10.3349/ymj.2004.45.1.43>
- [36] Wang, X., Meng, J., Zhang, J., Zhou, T., Zhang, Y., Yang, B., Xi, M., & Xia, X. (2012). Characterization of *Staphylococcus aureus* Isolated from powdered infant formula milk and infant rice cereal in China. *International Journal of Food Microbiology*, 153(1-2), 142-147. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2011.10.030>



- [37] Lesley, M. B., Ernie, S. R., Kasing, A., & Son, R. (2017). Detection of *Bacillus cereus* in formula milk and ultra high temperature (UHT) treated milk products. *International Food Research Journal*, 24(3), 985-989. Recuperado de [http://www.ifrj.upm.edu.my/24%20\(03\)%202017/\(12\).pdf](http://www.ifrj.upm.edu.my/24%20(03)%202017/(12).pdf)
- [38] Matug, S. M., Aidoo, K. E., & Elgerbi, A. M. (2015). Microbiological examination of infant food and feed formula. *Emergent Life Sciences Research*, 1(1), 46-51. Recuperado de <https://bit.ly/3t8qz9y>
- [39] Medina, G. A., Loreda, A., & Aguilar, N. (2014). *Cronobacter sakazakii*: Un patógeno emergente transmitido por alimentos. *Acta Química Mexicana*, 6(12), 24-29. Recuperado de <https://bit.ly/3gJhMFZ>
- [40] [40] European Food Safety Authority. (2013). Scientific opinion on nutrient requirements and dietary intakes of infants and young children in the European Union. *EFSA Journal*, 11(10), 1-103. doi: <https://doi.org/10.2903/j.efs.2013.3408>
- [41] Pei, X., Yang, S., Zhan, L., Zhu, J., Song, X., Hu, X., Liu, G., Ma, G., Li, N., & Yang, D. (2018). Prevalence of *Bacillus cereus* in powdered infant and powdered follow-up formula in China. *Food Control*, 93, 101-105. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2018.05.049>
- [42] Jianyun, S., Hu, X., Lan, G., & Dong, K. (2017). Investigation on microbial contamination of infant formula powder during production process. *Chinese Journal of Food Hygiene*, 29(4), 474-477. Recuperado de <https://bit.ly/3sXFQJZ>
- [43] Abbott, S. L., Moler, S., Green, N., Tran, R. K., Wainwright, K., & Janda, J. M. (2011). Clinical and Laboratory Diagnostic Characteristics and Cytotoxic Potential of *Hafnia alvei* and *Hafnia paralvei* Strains. *Journal of Clinical Microbiology*, 49(9), 3122-3126. doi: <https://doi.org/10.1128/JCM.00866-11>
- [44] Pukančíková, L., Lipničanová, S., Kačániová, M., Chmelová, D., & Ondrejovič, M. (2016). Natural microflora of raw cow milk and their enzymatic spoilage potential. *Nova Biotechnologica et Chimica*, 15(2), 142-155. doi: <https://doi.org/10.1515/nbec-2016-0015>
- [45] Souza Viana, E., Martino Campos, M. E., Reis Ponce, A., Cuchetto Mantovani, H., & Dantas Vanetti, M. C. (2009). Biofilm formation and acyl homoserine lactone production in *Hafnia alvei* isolated from raw milk. *Biological Research*, 42(4), 427-436. doi: <http://dx.doi.org/10.4067/S0716-97602009000400004>
- [46] Sezer, C., Vatanever, L., & Bilge, N. (2015). The microbiological quality of infant milk and follow - on formula. *Van Veterinary Journal*, 26(1), 31-34. Recuperado de <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/217577>
- [47] Zadoks, R. N., Griffiths, H. M., Munoz, M. A., Ahlstrom, C., Bennett, G. J., Thomas, E., & Schukken, Y. H. (2011). Sources of *Klebsiella* and *Raoultella* species on dairy farms: Be careful where you walk. *Journal of Dairy Science*, 94(2), 1045-1051. doi: <https://doi.org/10.3168/jds.2010-3603>
- [48] Babalola, M., & Adebayo, O. (2016). Detection of *Chronobacter sakazakii* and other enteropathogenic bacteria from selected brands of commercial powdered foods in Nigeria. *British Microbiology Research Journal*, 11(4), 1-13. doi: <https://doi.org/10.9734/BMRJ/2016/17912>
- [49] Xiao-hong, X., Ping, H., Lin-lin, W., Da-wei, Y., & Yu-zhong, Z. (2012). Detection and analysis of Enterobacteriaceae and other bacteria in commercial infant formula powder in Lanzhou city. *Chinese Journal of Health Laboratory Technology*. Recuperado de <https://bit.ly/3gFTAZF>
- [50] Cruz, A. T., Cazacu, A. C., & Allen, C. H. (2007). *Pantoea agglomerans*, a Plant Pathogen Causing Human Disease. *Journal of Clinical Microbiology*, 45(6), 1989-1992. doi: <https://doi.org/10.1128/JCM.00632-07>
- [51] Mardaneh, J., & Soltan Dallal, M. M. (2013). Isolation, identification and antimicrobial susceptibility of *Pantoea (Enterobacter) agglomerans* isolated from consumed powdered infant formula milk (PIF) in NICU ward: first report from Iran. *Iranian Journal of Microbiology*, 5(3), 263-267. Recuperado de <https://bit.ly/3zwBQCN>
- [52] Carvajal, D. (2013). Estudio de la presencia de *Enterobacter sakazakii* en fórmulas infantiles en polvo proporcionadas a pacientes lactantes de un hospital público de la ciudad de Guayaquil. Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil. Recuperado de <https://bit.ly/3ztyMap>
- [53] Davin-Regli, A., & Pagés, J. M. (2015). *Enterobacter aerogenes* and *Enterobacter cloacae*; versatile bacterial pathogens confronting antibiotic treatment. *Frontiers in Microbiology*, 6(MAY), 1-10. doi: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.00392>



- [54] Liu, L., Chen, D., Liu, L., Lan, R., Hao, S., Jin, W., Sun, H., Wang, Y., Liang, Y., & Xu, J. (2018). Genetic Diversity, Multidrug Resistance, and Virulence of *Citrobacter freundii* From Diarrheal Patients and Healthy Individuals. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, 8(JUL), 1-10. doi: <https://doi.org/10.3389/fcimb.2018.00233>
- [55] Giammanco, G. M., Aleo, A., Guida, I., & Mammina, C. (2011). Molecular Epidemiological Survey of *Citrobacter freundii* Misidentified as *Cronobacter* spp. (*Enterobacter sakazakii*) and *Enterobacter hormaechei* Isolated from Powdered Infant Milk Formula. *Foodborne Pathogens and Disease*, 8(4), 517-525. doi: <https://doi.org/10.1089/fpd.2010.0719>
- [56] Ma, X., Zhang, G., Li, G., Wan, Y., Sun, H., Wang, H., & Shi, B. (2018). Biofilm bacterial community transition under water supply quality changes in drinking water distribution systems. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 4(5), 644-653. doi: <https://doi.org/10.1039/C8EW00033F>
- [57] De Jonghe, V., Coorevits, A., Van Hoorde, K., Messens, W., Van Landschoot, A., De Vos, P., & Heyndrickx, M. (2011). Influence of storage conditions on the growth of *Pseudomonas* species in refrigerated raw milk. *Applied and Environmental Microbiology*, 77(2), 460-470. doi: <https://doi.org/10.1128/AEM.00521-10>
- [58] Dogan, B., & Boor, K. (2003). Genetic diversity and spoilage potentials among *Pseudomonas* spp. Isolated from fluid milk products and dairy processing plants. *Applied and Environmental Microbiology*, 69(1), 130-138. doi: <https://doi.org/10.1128/AEM.69.1.130-138.2003>
- [59] Avellan, F., & Parra, Y. (2019). Aislamiento e identificación de *Enterobacter sakazakii* en una marca de fórmulas lácteas del mercado local. Universidad de Guayaquil, Guayaquil. Recuperado de <https://bit.ly/38pt6Ti>
- [60] Earl, A. M., Losick, R., & Kolter, R. (2008). Ecology and Genomics of *Bacillus Subtilis*. *Trends in Microbiology*, 16(6), 269-275. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tim.2008.03.004>
- [61] U.S. Food & Drug Administration. (2012). BAM Chapter 29: *Cronobacter* | FDA. Recuperado de <https://bit.ly/3BIsIBu>
- [62] Kent, R., Fitzgerald, G., Hill, C., Stanton, C., & Ross, P. (2015). Novel approaches to improve the intrinsic microbiological safety of powdered infant milk formula. *Nutrients*, 7, 1217-1244. doi: <https://doi.org/10.3390/nu7021217>

Optical aptasensor for *in situ* detection and quantification of methylxanthines in *Ilex guayusa*

Brigitte León¹, Diana Mollocana¹, Diana Calderón¹, Andrea Montero-Oleas^{1,2,3},
María de Lourdes Torres¹

¹Universidad San Francisco de Quito USFQ, Colegio de Ciencias Biológicas y Ambientales, Laboratorio de Biotecnología Vegetal, Campus Cumbayá, Quito, Ecuador

²Université Grenoble Alpes and CNRS, Institut Néel, 38000, Grenoble, France

³Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Ciudad de Buenos Aires C1428EGA, Argentina

Autor para Correspondencia / Corresponding Author, e-mail: baleon@alumni.usfq.edu.ec

Aptasensor óptico para la detección y cuantificación *in situ* de metilxantinas en *Ilex guayusa*

Abstract

the present work pursued the development of a system to detect and quantify methylxanthines in *Ilex guayusa*. The system, called IPMA (*In situ* Plant Metabolite Aptasensor), is based on an optical aptasensor that integrates a DNA complex and a porphyrin (NMM IX). IPMA's ability to detect known amounts of theophylline and caffeine both in solution and infiltrated into *guayusa* leaves was evaluated. The detection limits determined were: 0.25 mM for theophylline in solution, 0.1 mM for caffeine in solution, and 130 mM for caffeine in *I. guayusa* leaves. These results demonstrate the potential of IPMA to detect and quantify metabolites of interest directly from biological samples. Developing this type of tool will provide a wide range of applications such as the *in situ* determination of physiological stress in plants and the characterization of plant varieties with a higher content of compounds of pharmaceutical or food interest.



Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /
Edited by:
Patricio Rojas

Recibido /
Received:
15/05/2021

Aceptado /
Accepted:
14/01/2022

Publicado en línea /
Published online:
16/05/2022

Keywords: aptasensor, aptamer, methylxanthines, caffeine, theophylline, *Ilex guayusa*

Resumen

El presente trabajo buscó el desarrollo de un sistema para detectar y cuantificar metilxantinas en *Ilex guayusa*. El sistema, denominado IPMA por sus siglas en inglés (Aptasensor de Metabolitos de Plantas *In situ*), se basa en un aptasensor óptico que integra un complejo de ADN y una porfirina (NMM IX). Se evaluó la capacidad de IPMA para detectar cantidades conocidas de teofilina y cafeína tanto en solución como infiltradas en hojas de *guayusa*. Los límites de detección determinados fueron: 0.25 mM para teofilina en solución, 0.1 mM para cafeína en solución y 130 mM para cafeína en hojas de *I. guayusa*. Estos resultados demuestran el potencial de IPMA para detectar y cuantificar metabolitos de interés directamente de muestras biológicas. El desarrollo de este tipo de herramienta ofrece una amplia gama de aplicaciones como la determinación *in situ* de estrés fisiológico en plantas y la caracterización de variedades vegetales con mayor contenido de compuestos de interés farmacéutico o alimentario.

Palabras clave: aptasensor, aptámero, metilxantinas, cafeína, teofilina, *Ilex guayusa*

INTRODUCTION

Detection and quantification of plant metabolites have generally involved the use of sophisticated laboratory facilities as well as complex and time-consuming methods. Conventional techniques include Liquid Chromatography (LC), Mass Spectrometry (MS), Gas Chromatography (GC), or their combination [1-3]. These techniques have shown fair accuracy and effectiveness with some limitations as they need sophisticated equipment and sample preparation steps that can lead to systematic errors [3,4]. In this sense, developing new techniques for rapid and accurate *in situ* detection and quantification of plant metabolites is essential. Biosensors are an excellent option to meet the needs of accuracy and speed since their advantages in cost, compact size, rapid response, and precision outweigh conventional techniques [5].

Biosensors are analytical devices that integrate a biological sensing component (enzyme, antibody, nucleic acid, and others) with a transducer, which generates a detectable response once an analyte has been detected [6,7]. Among the types of biosensors, optical ones stand for their capacity to induce a change in the absorption, emission, reflection, or refraction of light after the target analyte is recognized [8]. Several advantages come with optical biosensors, including high sensitivity, fast and easy measurements, and minimal invasion for *in situ* detection [8]. Optical biosensor design may involve aptamers, forming the so-called optical aptasensors [9]. Aptamers are single-stranded nucleic acids capable of binding specific molecules [4,10]. The development of optical aptasensors has been described for many applications that include agriculture, medical diagnostics, food, and environmental measurements [4,9,11,12].

In agriculture, optical aptasensors may assess crop quality and plant physiological state through the measurement of secondary metabolites [13]. These organic compounds play an essential role in plant interaction with the environment since their synthesis is a physiological response against biotic or abiotic stress conditions [14,15]. A significant group of plant secondary metabolites is methylxanthines. This set of compounds includes substances of particular interest such as caffeine and theophylline [16]. Caffeine is the most studied and used methylxanthine worldwide. The major effect of methylxanthines is the stimulation of the central nervous, respiratory, and circulatory systems [17]. At the same time, theophylline is an alkaloid used to treat certain lung conditions characterized by bronchoconstriction such as asthma [18]. The primary role of these substances in some plants has been associated with protection against pathogens and herbivores [19].

Ilex guayusa Loes. (*Aquifoliaceae*) is a native plant of the Ecuadorian, Peruvian, and Colombian Amazon region whose use as an infusion by local communities has demonstrated its potential over time. Due to its stimulating properties, guayusa has aroused an interest in the food and pharmacological industries [20]. Guayusa is one of the most abundant caffeine sources known, with concentrations that can nearly reach 17 milligrams per gram of dry leaf [21,22]. Although the caffeine content of guayusa has appropriately been described, information about the phytochemical content of this plant is still limited. More knowledge about the phytochemical content in guayusa could be helpful in the optimization of new and straightforward techniques that allow the characterization of guayusa's cultivars and their possible management and uses.

In this research, we developed an *In situ* Plant Metabolite Aptasensor (IPMA) that adopts the system reported by Rankin et al. [23] and the recognition strategy of Rivera [24] to quantify caffeine and theophylline directly from guayusa leaves in a fast and easy way. The system is integrated by a DNA complex and the N-methyl mesoporphyrin IX dye (NMM IX). The DNA complex consists of a DNA aptamer linked to the C-myc oligonucleotide by seven complementary bases. The NMM IX acts as a signal transducer as it exhibits unique optical properties when interacting with quadruplex DNA structures (GQ) [25]. When caffeine or theophylline is present, the DNA complex disassembles, making the DNA aptamer bind to the methylxanthine. At the same time, the interaction between GQ C-myc and the dye generates fluorescence (Figure 1).

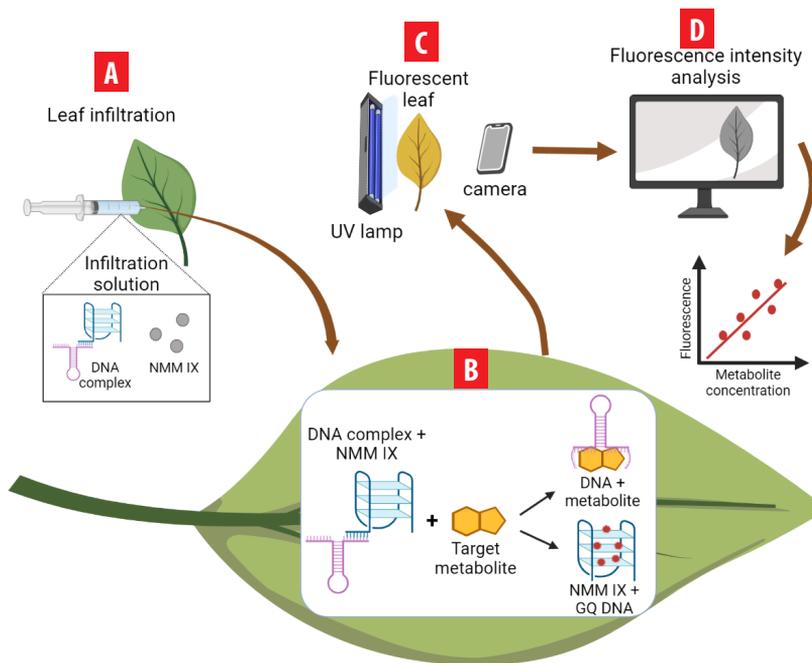


Figure 1. IPMA system scheme. **A)** DNA complex, NMM IX, and methylxanthine solutions are infiltrated into the leaf. **B)** 30-minute incubation under darkness is performed. **C)** Fluorescence is observed through a UV lamp. **D)** The picture taken is then analyzed through Image J software to measure the fluorescence intensity and determine the methylxanthine concentration (mM). This graphical scheme was created in BioRender.

We evaluated the efficiency of the IPMA system for detecting and quantifying caffeine in *Ilex guayusa* leaves. Nevertheless, we first validated the system with theophylline and caffeine in solution assays. This research demonstrates the versatility of the IPMA system and presents it as a useful, inexpensive, and reliable metabolite quantification method with the potential to be translated into an agricultural tool.

MATERIALS AND METHODS

DNA complex assembly

The DNA aptamer (5'-GGCGA(dU)ACCAGCCGAAAGGCC(dU)(dU)GGCAGCG(dU)C-3') and the C-myc oligonucleotide (5'-TGGGGAGGGTTTTAGGGTGGGATATCGCC-3') (The Midland Certified Reagent Co) were resuspended in TE 1X buffer (5 mM Tris-HCl, 0.5 mM EDTA, pH 7.0) and were quantified in a Nanodrop 2000 (Thermo Scientific). The DNA complex (DNA aptamer - C-myc) assembly was carried out in an Eppendorf microtube with 10 μ moles of DNA aptamer (200 μ M), 10 μ moles of oligo C-myc (200 μ M), and 100 μ L of HEPES buffer (50 mM HEPES, 40 mM KCl, 400 mM NaCl, 0.1% (w/v) Triton X-100, 2% (v/v) DMSO, pH 7.0). The oligonucleotide suspensions were heated using a thermocycler (TPersonal, Biometra) with an initial temperature of 95°C for 5 minutes; then, two cycles of 80°C (1 minute), 60°C (1 minute), 40°C (1 minute), 30°C (5 minutes); and a final cooling at 4°C for 10 minutes. The assembled complex was stored at -20°C.

DNA complex assembly verification

The DNA complex assembly test was based on the NMM IX (Frontier Scientific) absorption spectra analysis. For this, 2 μ L of the DNA complex, previously assembled, was placed on a spectrophotometer microplate (Multiscan Sky, Thermo Fischer), and the UV-visible spectrum was collected.

Theophylline and caffeine stocks preparation and quantification

The caffeine stock solution was prepared by dissolving 5 mg of anhydrous caffeine powder (Refaquim) in 1 mL of ultra-pure water. The solution was homogenized on a shaker at room temperature and then stored at 4°C. The theophylline stock solution was prepared by grinding up 250 mg of theophylline tablets (Genfar) into a fine powder. Then, 100 mL of phosphate buffer (66.72 mM KH_2PO_4 , 80.87 mM Na_2HPO_4 , pH 7.4) was added. The solution was incubated at 37°C under constant stirring for 24 hours and then stored at 4°C. The solutions were quantified by spectrophotometry (Multiscan Sky, Thermo Fischer) using the Lambert Beer-Bouguer law. For theophylline, the molar extinction coefficient was 10200 $\text{cm}^{-1} \text{M}^{-1}$ at 277 nm [27], and for caffeine, 9900 $\text{cm}^{-1} \text{M}^{-1}$ at 272 nm [26].

Plant material

Guayusa leaves were obtained from plants maintained at the greenhouse of the Plant Biotechnology Laboratory (USFQ). We collected equal-sized leaves from the same branch of the plant.

IPMA system validation and optimization

A solution test was performed to validate the effectiveness of the IPMA system to detect methylxanthines. For this purpose, two solutions were prepared: a) 25 μ L solution containing the DNA complex (50 μ M), NMM IX (50 μ M), and theophylline (7 mM) and b) 25 μ L solution with the DNA complex (50 μ M), NMM IX (50 μ M), and PCR-grade water.



For the IPMA system optimization, several factors were considered, including the DNA complex – NMM IX concentration, the operating temperature, and the fluorescence analysis.

DNA complex – NMM IX concentration

Several solution tests were carried out to determine the optimal DNA complex – NMM IX concentration. Five ratios were evaluated (2:1, 4:1, 10:1, 20:1, and 40:1). 20 μ L solutions containing the DNA complex (4 μ M), NMM IX (2 μ M, 1 μ M, 0.4 μ M, 0.2 μ M, 0.1 μ M), and theophylline (7000 μ M) were prepared. In parallel, 20 μ L solutions containing the DNA complex (4 μ M), NMM IX (2 μ M, 1 μ M, 0.4 μ M, 0.2 μ M, 0.1 μ M), and PCR-grade water were elaborated. Each solution was prepared in duplicate and incubated under darkness and at room temperature for 25 minutes approximately.

The selection criteria for the optimal DNA complex – NMM IX concentration were: i) the solution containing the DNA complex – NMM IX and the methylxanthine should exhibit high fluorescence signal easily identifiable to the naked eye, and ii) the solution containing the DNA-NMM IX complex in the absence of methylxanthine should have a low fluorescence signal.

Temperature

To identify the aptasensor optimal operating temperature, the absorption spectra of the DNA complex – NMM IX at different temperatures were analyzed. 500 μ L of a solution containing 20 μ M of the assembled DNA complex and 2 μ M of NMM IX was prepared. 2 μ L of the solution were placed on the spectrophotometer microplate reader (Multiscan Sky, Thermo Fischer), and the temperature was increased from 21°C to 43°C. The UV-visible spectra were collected each time the temperature increased by one-degree centigrade.

Fluorescence analysis

To identify the best way to capture the fluorescent signal, two different lighting systems were used. The first was the Bio-Imaging lamp (HK-01-DNR) that emits light with a wavelength between 380 and 420 nm. The second lighting system was a blue LED box (Maviju IL070206) which is a wooden box with a blue LED light bulb inside that emits light with a wavelength between 440 and 460 nm.

In both cases, photographs of the leaves exposed to the lighting systems were taken with a mobile camera (Samsung S20+). The angle of capture and the distance from the camera to the sample were controlled and kept constant in all shots (Figure 2C). All the photos were analyzed with Image J 1.52v. The intensity of the fluorescent solutions was calculated by measuring the integrated density of the image previously split in RGB channels. The measurements were done in Eppendorf tubes for the solution tests and in areas that visibly fluoresced on the guayusa leaves. In the Image J software 1.52v, only the red channel was used for the corresponding analysis.

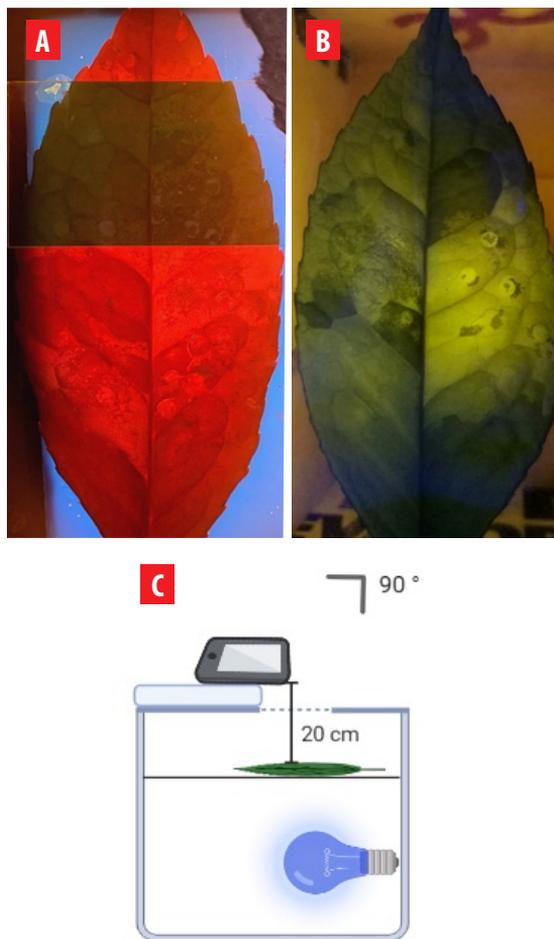


Figure 2. Two lighting systems for fluorescence signal. A) Bio-Imaging lamp (380 to 420 nm). B) Blue LED (440 to 460 nm). C) Lighting systems capturing images scheme.

IPMA validation for quantification of theophylline and caffeine in solution

The assembled DNA complex and the NMM IX were placed in four Eppendorf (1.5 mL) tubes in a 10:1 proportion (5 μ M and 0.5 μ M, respectively). Next, a known concentration of theophylline (7 mM, 1.5 mM, 0.4 mM, and 0 mM) or caffeine (6 mM, 3 mM, 0.2 mM, and 0 mM) was added in each tube. Ultra-pure water was added in a fifth tube instead of the methylxanthines as a blank. The solutions were homogenized and incubated in the dark and at room temperature for 60 minutes approximately.

IPMA validation for quantification of caffeine in guayusa leaves

I. guayusa young leaves were immersed in Agrex-F 0.1% (Tekquimik) solution for 60 minutes. Then, known concentrations of caffeine (0 mM, 150 mM, and 300 mM)

solutions were syringe-infiltrated into specific areas of the leaves. The assembled DNA complex (5 μM) and the NMM IX (0.5 μM) were infiltrated near the spot where the caffeine solution was injected. The leaves were immediately incubated in the dark and at room temperature for 20 minutes. All assays were run in duplicate.

RESULTS

DNA complex assembly verification

The DNA complex assembly test was based on the dye (NMM IX) absorption spectra analysis. The absorption spectrum of the NMM IX incubated with the assembled DNA complex showed maximum absorption at 378 nm. On the other hand, the maximum absorption of the dye incubated with the unassembled DNA complex occurred at 399 nm (Figure 3). These results demonstrate that the assembled DNA complex does not induce any change in NMM IX's optical properties, indicating that the assembly process was successful.

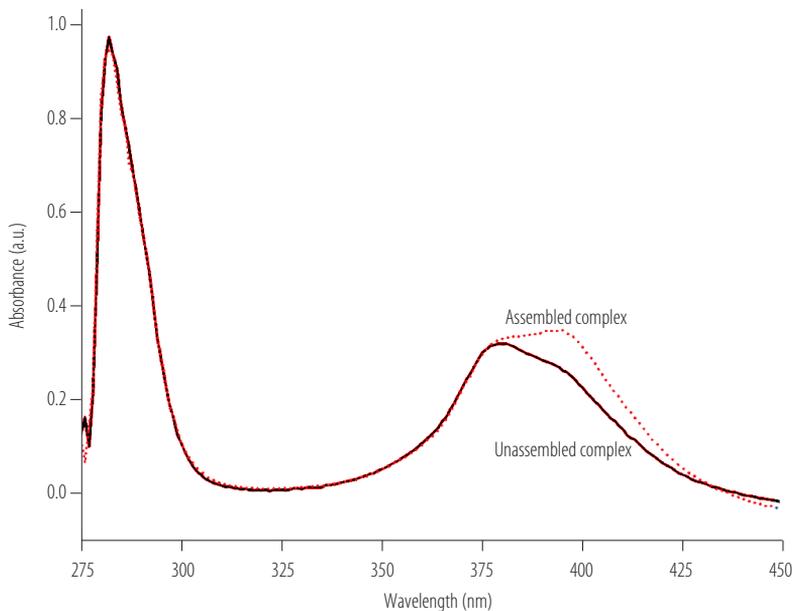


Figure 3. Absorption spectrum of NMM IX incubated with the assembled DNA complex; a maximum absorption of NMM IX at 399 nm is observed when the DNA complex is properly assembled.

IPMA System validation and optimization

In the validation test, an almost 20-fold fluorescence increase was identified in the presence of 7 mM theophylline, which could be observed at first glance (Figure 4). This fluorescence increase is due to the presence of theophylline in the solution, which demonstrates IPMA's ability to detect a methylxanthine.

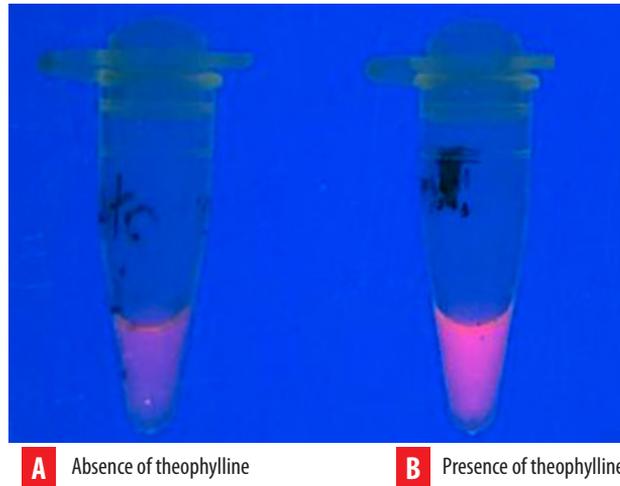


Figure 4. IPMA validation in solution. **A)** DNA complex and NMM IX solution. **B)** DNA complex and NMM IX incubated with theophylline (7 mM). A 20-fold increase in fluorescence was measured in the theophylline-containing solution.

Regarding IPMA's optimization, the results are described below:

DNA complex and NMM IX concentration

Three of the five DNA complex – NMM IX ratios tested (10:1, 20:1, and 40:1) met the two criteria (see Methods) for the proper functioning of the aptasensor. None of the ratios showed significant differences regarding their fluorescence intensity ($p > 0.05$ for the one-way ANOVA). However, since the lowest concentration of reagents is desirable, the 10:1 ratio was selected for IPMA as the optimal DNA complex – NMM IX (Figure 5).

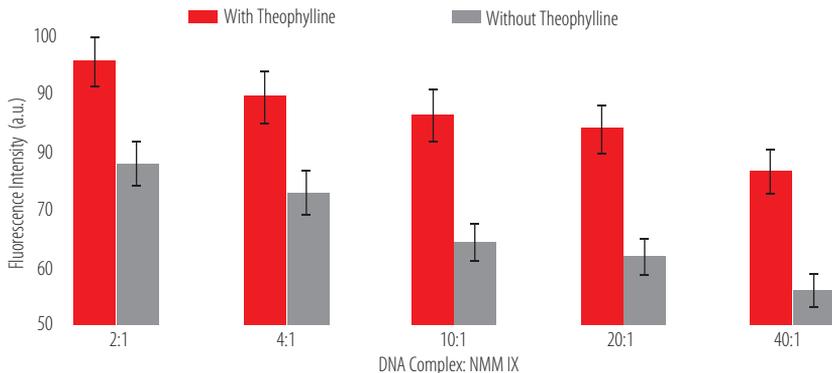


Figure 5. DNA complex – NMM IX concentration optimization. The fluorescence intensity on a theophylline-containing solution and on a theophylline-non-containing solution was analyzed in five different ratios. There were no significant differences ($p > 0.05$ for the one-way ANOVA).

Temperature

To determine the temperature at which the DNA complex assembly is no longer stable, we analyzed the DNA complex – NMM IX absorption spectra at different temperatures. A gradual movement of the NMM IX's maximum absorption peak towards 399 nm was observed when the temperature was around 29 - 33°C (Figure 6). The maximum absorbance at 399 nm indicates that the complex has disassembled. In this case, the disassembly occurs due to the temperature only (since there is no methylxanthine present in the solution). This means that the biosensor works properly at temperatures lower than 29°C; above this temperature, non-specificities could be observed.

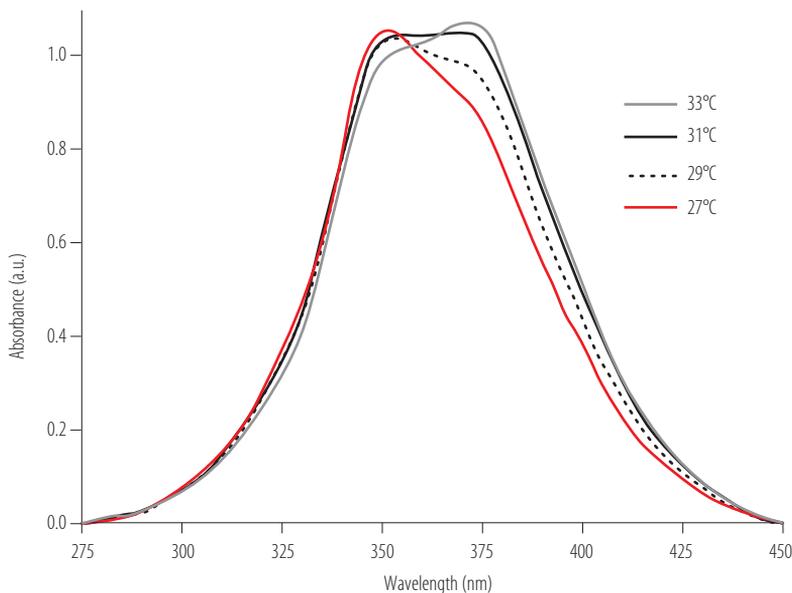


Figure 6. Absorption spectra of NMM IX incubated with the assembled DNA complex. The spectra collected at different temperatures are shown. A gradual movement of 21 nm of the maximum absorption peak is observed.

Fluorescence analysis system

The Bio-Imaging lamp was the best lighting system to capture fluorescence from the solution tests. Nevertheless, when guayusa leaves were illuminated with the Bio-Imaging lamp, it was impossible to identify fluorescence attributable to NMM IX, as the entire leaf surface fluoresced (Figure 2A). However, when the guayusa leaves were illuminated with the blue LED box, NMM IX's fluorescence was easily detectable (Figure 2B). The best fluorescent signal using this lamp was observed when the sample was placed at an angle of 90° and 20 cm from the detector.

IPMA for quantification of theophylline and caffeine in solution

The fluorescent signal in the solution tests showed a direct proportional relationship to the methylxanthine concentration (theophylline or caffeine) (Figures 7 and 8). The

trend line generated with fluorescence shows the same trend as that obtained with UV-vis spectrophotometry. A high correlation was determined when this fluorescence was analyzed through Image J ($R^2 = 0.90$ for theophylline; $R^2 = 0.986$ for caffeine). The limits of detection (LOD) were calculated following the equation:

$$LOD = Blank + 3\delta$$

where δ is one standard deviation [28].

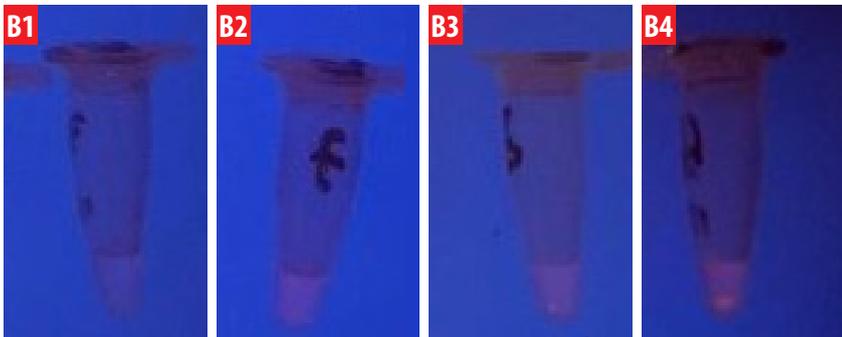
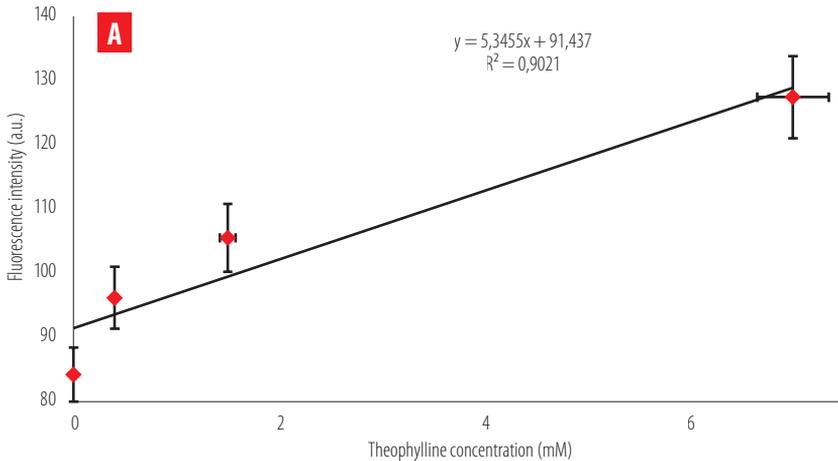


Figure 7. Fluorescence intensity as a function of theophylline content in solution. **A)** The fluorescence intensity detected through Image J is shown for four theophylline concentrations incubated with IPMA. **B)** Fluorescence visualization of the four theophylline concentrations (**B1** = 0 mM; **B2** = 0.4 mM; **B3** = 1.5 mM; **B4** = 7 mM) under the Bio-Imaging lamp and Multiscan Sky, respectively.

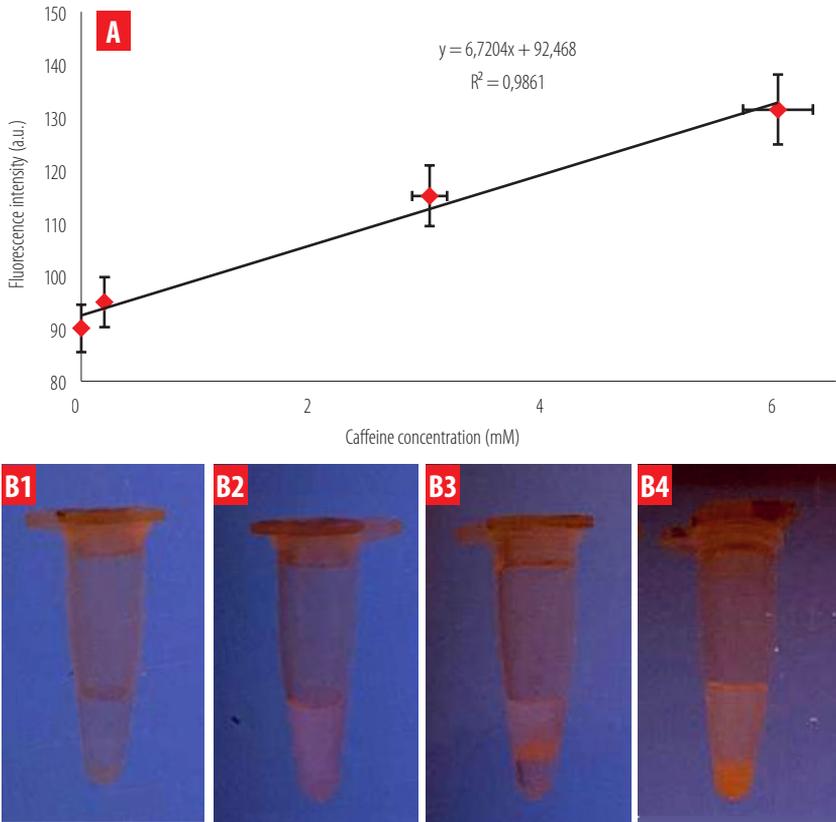


Figure 8. Fluorescence intensity as a function of caffeine content in solution. The fluorescence intensity detected through Image J is shown for four caffeine concentrations incubated with IPMA. **B**) Fluorescence visualization of the four caffeine concentrations (**B1** = 0 mM; **B2** = 0.2 mM; **B3** = 3 mM; **B4** = 6 mM) using the Bio-Imaging lamp and Multiscan Sky, respectively.

The obtained LOD values were 0.1 mM for caffeine and 0.25 mM for theophylline, respectively. Fluorescence intensity changes due to methylxanthine concentration were more evident for caffeine than for theophylline.

IPMA for quantification of known concentrations of caffeine in *Ilex guayusa* leaves

In *I. guayusa* leaves, the fluorescent signal showed a proportional behavior with respect to the syringe-infiltrated caffeine concentration (Figure 9A). A high correlation was also determined when this fluorescence was analyzed through Image J ($R^2 = 0.99$). A limit of detection (LOD) of 130 mM was calculated.

As shown in Figure 9B, the fluorescence increment is detectable to the naked eye, but it is less evident compared to the solution treatments.

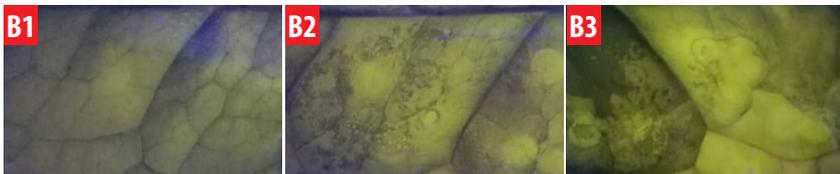
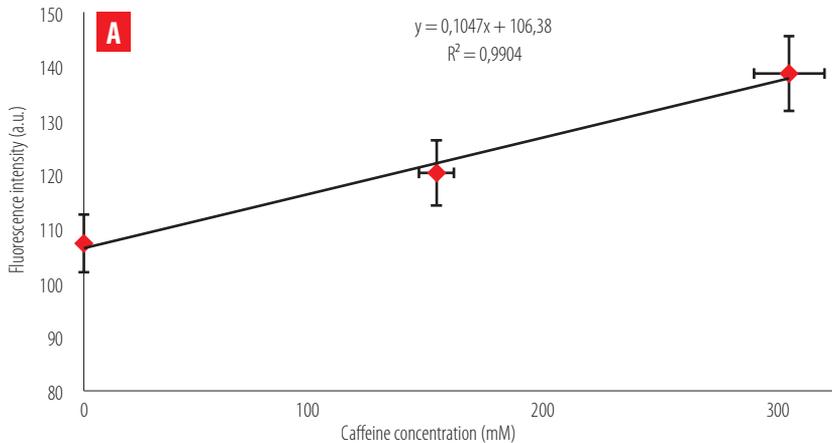


Figure 9. Fluorescence intensity as a function of caffeine content in guayusa leaves. **A)** Fluorescence intensity detected through Image J is shown for three different caffeine concentrations infiltrated into guayusa leaves. **B)** Fluorescence visualization of the three caffeine concentrations (**B1** = 0 mM; **B2** = 150 mM; **B3** = 300 mM) using a Blue LED box.

DISCUSSION

IPMA quantification strategy

In this study, we present an efficient, fast, and cost-effective tool for plant metabolites quantification. We propose a specific mechanism of function of the IPMA systems based on the disassembly of the DNA complex when a methylxanthine is present. As the hydrogen bonds break, the DNA aptamer separates from the C-myc oligo and changes its structure to bind the methylxanthine. The C-myc oligo adopts its natural G-quadruplex (GQ) structure and is free to interact with the dye (NMM IX). It has been reported that the binding of NMM IX and GQ-DNA allows NMM IX to fluoresce with great intensity [29,30] (Figure 1).

Aptasensors using NMM IX and a GQ-DNA structure have been widely reported for environmental monitoring [30,31]. The unique NMM IX chemical properties have made it useful in medical sciences for the localization of non-canonical DNA structures, such as those involved in genomic stability and cancer [32]. Other applications of these kinds of biosensors include detecting simple and complex molecules such as proteins [33], toxins [34], or pesticides [35]. Precisely, one of the most remarkable examples in



terms of agricultural applications is an NMM-GQ sensor to detect organophosphates in agricultural products [36]. However, to the best of our knowledge, no biosensor prototype based on GQ-DNA and NMM IX has been reported for *in situ* plant metabolite detection and quantification. In this sense, our IPMA system constitutes an innovative alternative to detect a target molecule directly from plant leaves quickly and efficiently.

IPMA System Optimization

Once it was verified that the IPMA strategy worked and allowed the detection of methylxanthines, it was necessary to optimize some factors to achieve a good enough fluorescence signal to quantify the target molecule accurately.

The first optimized factor was the concentration of the DNA complex and the dye (NMM IX). Three ratios were observed to work well. However, since the 10:1 ratio uses the lowest reagent concentration, it was selected for the IPMA subsequent tests. The use of a molar excess of 10 DNA molecules for each NMM molecule has been previously reported as a good ratio to obtain enhanced fluorescence signals [31]. Evaluating the DNA complex – NMM IX concentration is a crucial factor to avoid erroneous quantifications since an excess or lack of DNA could affect the interpretation of the fluorescence signal [37].

Another optimized factor was the temperature. DNA complex kept assembled in the absence of the target and disassembled in its presence. Therefore, the aptamer recognition of its caffeine or theophylline target depends on breaking the hydrogen bonds that join DNA molecules. It is known that the hydrogen bonds that generate the complementarity of bases can be broken easily as a function of temperature [38,39]. For instance, it is necessary to establish the temperature at which the DNA complex assembly remains stable. The absorption spectrum of NMM IX was studied to identify the optimal assembly temperature of the DNA complex. NMM IX has two unique optical properties in the presence of a GQ structure like C-myc. First, it presents a 60-fold increase in fluorescence compared to its basal state when the emission spectrum is analyzed. Second, it exhibits a 21 nm red shift in the absorption spectrum. This means that when NMM IX is in solution, it has a maximum light absorption at 378 nm, but in the presence of a GQ structure, the maximum absorption is at 399 nm [33, 40]. To verify that the DNA complex assembly was no longer stable, it was necessary to identify the temperature at which the 21 nm red shift phenomena occurred. As can be seen in Figure 5, the red shift occurred gradually between 29°C and 33°C. This proves that the complex assembles well below 29°C. At higher temperatures, the fluorescence observed might be increased by the spontaneous disassembly of the DNA complex.

A third optimized factor was fluorescence visualization. For the solution tests, fluorescence differences with theophylline were less noticeable to the naked eye than with caffeine when analyzed with Image J. Such observations were made considering that the perception of color depends on several factors, mainly light source, detection mode, and the detector [41]. In humans, color perception is difficult to control since it depends on the interaction of signals generated by photoreceptors sensitive to the visible electromagnetic spectrum [42]. For leaf assays, when the guayusa leaves were placed on different light sources, there were differences in the fluorescence visualization



(Figure 6). A variety of fluorescent molecules can be found in biological samples [21]. One of the main components of plants is chlorophylls, which can absorb and emit light at different wavelengths [44]. It has been reported that plants of the *Ilex* genus have chlorophyll A and B, but there is no information about their content in *I. guayusa* leaves [45]. The maximum absorption for chlorophyll A occurs at 372 nm, and for chlorophyll B at 392 nm [44,45]. On these premises, it can be assumed that the observed fluorescence when the leaf was exposed to a Bio-imaging lamp is in part due to the emission of chlorophyll and not to IPMA.

IPMA for the quantification of theophylline and caffeine

It was determined that as the methylxanthine (theophylline or caffeine) concentration increases, the emitted fluorescent signal increases as well. This is a particular fact of systems based on GQ – NMM IX complexes, in which the fluorescence emitted is directly proportional to the analyte concentration [25].

When evaluating the performance of an aptasensor, it is essential to analyze the detection limit (LOD). The LOD corresponds to the minimum concentration of a substance whose detection signal is significantly different from the blank (background) [46]. For theophylline in solution, the LOD was 0.25 mM, a value that, although in the range previously described for aptamer-based biosensors (50 nM – 600 μ M) [47], is much higher than the values reported in Rankin et al. [23] for RNA aptamers. In the case of caffeine in solution, the LOD was 90.01 μ M, a lower value than that reported for theophylline but which is still higher than the LOD described by McKeague & DeRosa [48] for xanthines (<10 μ M).

In the guayusa leaves, the calculated LOD was 130 mM of caffeine. This LOD does not correspond to the natural caffeine content in the leaf but to the injected caffeine solution. This is a limitation of the IPMA system that should be overcome through a standardization. To achieve this, it will be necessary to validate the IPMA measurements using another quantification method. Methods for quantifying methylxanthine in leaves often require more sophisticated equipment or extractions that involve manipulations with solvents that are not readily available [49]. However, the results obtained with the caffeine solution injected into the leaf are proof of the concept that IPMA is efficient for quantifying caffeine in a matrix such as the guayusa leaf.

Although the diversity of optical biosensors for detecting compounds of interest in plants is quite large, an aptasensor like this one has not been developed before. The most similar development has been nanosensors for detecting metabolites in animal and fungal cells, both *in vivo* and *in vitro* conditions [50].

Theophylline and caffeine are metabolites of great interest for which several types of sensors have been proposed, either electrochemical [51] or through fluorescent probes using chemical compounds [52]. Since 2007 there have been reports of amperometric biosensors with the capacity to detect from 0.1 to 1 mg/mL of caffeine in solution, but with a complex structure that restricts the possibility of performing *in situ* quantifications [53]. Although IPMA's LOD does not reach the level of sensitivity offered by other alternatives, a feature that can be optimized, it requires only a DNA complex – NMM IX



and a blue light lamp, which can be easily adapted as a portable tool for detection of the methylxanthine content in guayusa and other plants.

Towards an agricultural analysis tool

Part of the agriculture transition involves the adoption of new, easy-to-use, and affordable innovations [54]. Several optical aptasensors have been described as a potential tool for food safety and food fraud indicators, as well as sustainable agriculture supporters [55,56]. In fact, detecting and quantifying a secondary metabolite could help farmers to make corrective actions or infer the quality of a crop. As an example, it is known that theobromine is a secondary metabolite of *Theobroma cacao* that is associated with the cacao's quality due to the bitterness that this substance might give to the chocolate [57,58]. In this sense, a system such as IPMA could allow the selection of *T. cacao* cultivars according to the amount of theobromine present.

Further applications of aptasensors could be selecting cultivars with higher contents of methylxanthines or even other types of molecules. Such selection could facilitate the production of more naturally stimulating products, especially for the hot tea beverage industry. Also, physiological studies applied to crops could allow growers to infer possible stress mitigation strategies at the irrigation, nutrition, or even pathogen control approaches. For example, naringenin is a metabolite produced by citrus trees in response to attacks by certain insects [59]. If the amount of naringenin is quantified in the plant tissues, the magnitude of a pest could be assessed and appropriate corrective treatments (insecticide) could be applied [60]. In guayusa, very little is known about the physiological function of caffeine; therefore, detecting and quantifying this substance from its leaves under different environmental stimuli could contribute to learning more about the importance of this compound for the physiology and adaptation of this fascinating Amazonian plant.

CONCLUSION

IPMA constitutes a compelling attempt to detect and quantify plant metabolites, which would support agricultural practices. Moreover, the simplicity, portability, and adaptability of the IPMA technology make it suitable as an *in situ* application. The cost advantage is another aspect that must be considered as IPMA does not need sophisticated facilities for the analysis. The results obtained in this study suggest that the IPMA strategy corresponds to a turn-on, enzyme-free, GQ – NMM IX optical biosensor with a great potential to detect and quantify plant metabolites both in solution and in plant tissues. Our system could detect theophylline (0.25 mM as LOD) and caffeine (0.1 mM as LOD in solution and 130 mM as LOD in the guayusa leaf).

Even though the IPMA system is specific to caffeine and theophylline, optical biosensors based on DNA aptamers are versatile and can be applied to detect and quantify several molecules of interest. In *I. guayusa*, the *in situ* quantification of caffeine content could be interesting for evaluating the metabolite content of different cultivars.



ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to thank the USFQ Laboratory of Plant Biotechnology for their support in the development of this research. The authors are very grateful to Miguel Ángel Mendez, who provided us with some of the initial reagents for the project's development.

FUNDING

This project was carried out with funds provided by Universidad San Francisco de Quito USFQ's internal funding program "COCIBA Grants 2019."

AUTHORS' CONTRIBUTIONS

B.L., A.M., D.M. and D.C. performed the experiments, and wrote the manuscript. B.L. and A.M. developed the methodology. M.L.T supervised the research and the manuscript.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors have no conflicts of interest to declare.

REFERENCES

- [1] Fiehn, O. (2016). Metabolomics by Gas Chromatography-Mass Spectrometry: Combined Targeted and Untargeted Profiling. *Current Protocols on Molecular Biology*, 114, 30.4.1-30.4.32. doi: <http://doi.org/10.1002/0471142727.mb3004s114>
- [2] Jorge, T. F., Mata, A., & António, C. (2016). Mass Spectrometry as a Quantitative Tool in Plant Metabolomics. *Phil. Trans. R. Soc. A*, 374. doi: <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2015.0370>
- [3] Lu, W., Su, X., Matthias, S., Klein, I., Lewis, A., Fiehn, O., & Rabinowitz, J. D. (2017). Metabolite Measurement: Pitfalls to Avoid and Practices to Follow. *Annual Review of Biochemistry*, 86, 277–304. doi: <http://doi.org/10.1146/annurev-biochem-061516-044952>
- [4] Liu, M., Khan, A., Wang, Z., Liu, Y., Yang, G., Deng, Y. & He, N. (2019). Aptasensors for Pesticide Detection. *Biosensors and Bioelectronics*, 130, 174-184. doi: <http://doi.org/10.1016/j.bios.2019.01.006>
- [5] Serna-Cock, L., & Perenguez-Verdugo, J. G. (2011). Biosensors Applications in Agri-Food Industry. *Environmental Biosensors* (May). doi: <http://doi.org/10.5772/16744>
- [6] Gouvea, C. (2011). Biosensors for Health Applications. *Biosensors for Health, Environment and Biosecurity*, 71-85. doi: <http://doi.org/10.5772/17103>
- [7] Romero, M. (2012). *Estudio Químico y Electroquímico de Interacciones Entre Biomoléculas y Sus Aplicaciones En Biosensores*. (Doctoral Thesis). Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- [8] Malhotra, B. D., & Ali, M. A. (2018). Nanomaterials in Biosensors: Fundamentals and Applications. In *Nanomaterials for Biosensors*. Elsevier. doi: <https://doi.org/10.1016/C2015-0-04697-4>
- [9] Feng, C., Dai, S., & Lei, W. (2014). Optical Aptasensors for Quantitative Detection of Small Biomolecules: A Review. *Biosensors and Bioelectronics*, 59, 64-74. doi: <http://doi.org/10.1016/j.bios.2014.03.014>
- [10] Hernández, J., & Botero Hincapié, J. A. (2012). Aptámeros: Agentes Diagnósticos y Terapéuticos. *latreia*, 25(2), 159-168. ISSN 0121-0793. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=180523365008>
- [11] Hong, P., Li, W., & Li, J. (2012). Applications of Aptasensors in Clinical Diagnostics. *Sensors. Sensors (Basel)*, 12(2), 1181–1193. doi: <https://doi.org/10.3390/s120201181>
- [12] Sett, A., Das, S., Sharma, P., & Bora, U. (2012). Aptasensors in Health, Environment and Food Safety Monitoring. *Open Journal of Applied Biosensor*, 1(2). doi: <https://doi.org/10.4236/ojab.2012.12002>
- [13] Rana, J. S., Jindal, J., Beniwal, V., & Chhokar, V. (2010). Utility Biosensors for Applications in Agriculture – A Review. *Journal of American Science*, 6(9), 353-375. <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.469.8344&rep=rep1&type=pdf>
- [14] Kumar Sharma, R., & Kumar, I. (2018). Production of Secondary Metabolites in Plants under Abiotic Stress: An Overview. *Significances of Bioengineering & Biosciences*, 2(4). doi: <https://doi.org/10.31031/sbb.2018.02.000545>
- [15] Pagare, S., Manila, B., Tripathi, N., & Bansal, Y. K. (2015). Secondary Metabolites of Plants and Their Role: Overview. *Current Trends in Biotechnology and Pharmacy*, 9(3), 293-304. ISSN 2230-7303 (Online).
- [16] Andreeva, E. Y., Dmitrienko, S. G., Zolotov, Y. A. (2012) Methylxanthines: properties and determination in various objects *Russian Chemical Reviews*, 81(5), 397-414. doi: <http://dx.doi.org/10.1070/RC2012v081n05ABEH004220>
- [17] Evans, J., Richards, J. R., & Battisti, A. S. (2021) Caffeine. In: *StatPearls*. StatPearls Publishing.
- [18] Bucklin, M. H., & Groth, C. M. (2014). Theophylline. In *Encyclopedia of Toxicology (Third Edition)*. Elsevier. ISBN: 978-0-12-386455-0
- [19] Ashihara, H., Kato, M., & Crozier, A. (2011). Distribution, biosynthesis and catabolism of methylxanthines in plants. *Handb. Exp. Pharmacol.*, 200, 11-31. doi: http://doi.org/10.1007/978-3-642-13443-2_2
- [20] Kapp, R., Mendes, O., Roy, S., & McQuate, R. (2016). General and Genetic Toxicology of Guayusa Concentrate (*Ilex guayusa*). *International Journal of Toxicology*, 35(2), 222-242. doi: <https://doi.org/10.1177/1091581815625594>
- [21] Rätsch, C. (2005). *The encyclopedia of psychoactive plants: Ethnopharmacology and its applications*. Simon and Schuster.



- [22] Melo, V. (2014). Composición y análisis fitoquímico de la especie *Ilex guayusa* Loes. (Thesis). Universidad San Francisco de Quito, Ecuador.
- [23] Rankin, C. J., Fuller, E. N., Hamor, K. H., Gabarra, S. A., & Shields, T. P. (2006). A Simple Fluorescent Biosensor for Theophylline Based on Its RNA Aptamer. *Nucleosides, Nucleotides and Nucleic Acids*, 25(2), 1407-1424. doi: <http://doi.org/10.1080/15257770600919084>
- [24] Rivera, P. (2016). Diseño de un sistema de reporte, específico, in vitro de un metabolito de interés agroindustrial, teofilina, vía ensayos con aptámeros y fluorescencia (Thesis). Universidad San Francisco de Quito USFQ.
- [25] Yett, A., Yingqi, L., Beseio, D., Miao, J., & Yatsunyk, L. A. (2019). N-Methyl Mesoporphyrin IX as a Highly Selective Light-up Probe for G-Quadruplex DNA. *Journal of Porphyrins and Phthalocyanines*, 23(11n12), 1195-1215. doi: <https://doi.org/10.1142/S1088424619300179>
- [26] Schack, J. A., & Waxler, S. H. (1949). An Ultraviolet Spectrophotometric Method for the Determination of Theophylline and Theobromine in Blood and Tissues. *The Journal of Pharmacology and Experimental Therapeutics*, 97(3), 283-91. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15392550/>
- [27] Londoño-Larrea, P., Zapata, S., Lara-Lopez, M., & Villamarin-Barriga, E. (2018). Preliminary study of caffeine extraction from *Ilex guayusa* L. leaves using supercritical carbon dioxide. *Conference: MOL2NET 2018, International Conference on Multidisciplinary Sciences (4th edition)*. doi: <https://doi.org/10.3390/mol2net-04-05297>
- [28] Miller, J. N., & Miller, J. C. (2010). *Statistics for analytical chemistry*: 6th ed. Pearson Education Limited.
- [29] Schack, J. A., & Waxler, S. H. (1949). An Ultraviolet Spectrophotometric Method for the Determination of Theophylline and Theobromine in Blood and Tissues. *The Journal of Pharmacology and Experimental Therapeutics*, 97(3), 283-91. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15392550/>
- [30] Umar, M. I., Ji, D., Chan, C. Y., & Kwok, C. K. (2019). G-Quadruplex-Based Fluorescent Turn-On Ligands and Aptamers: From Development to Applications. *Molecules*, 24(13), 2416. doi: <https://doi.org/10.3390/molecules24132416>
- [31] Zhao, C., Wu, L., Ren, J., & Qu, X. (2011). A Label-Free Fluorescent Turn-on Enzymatic Amplification Assay for DNA Detection Using Ligand-Responsive G-Quadruplex Formation. *Chemical Communications*, 47(19), 5461-63. doi: <https://doi.org/10.1039/c1cc11396h>
- [32] Sabharwall, N., Savikhin, V., Turek-Herman, J., Nicoludis, J., Szalai, V., & Yatsunyk, L. (2014). N-methylmesoporphyrin IX fluorescence as a reporter of strand orientation in guanine quadruplexes. *FEBS Journal*, 281(7), 1726-1737. doi: <https://doi.org/10.1111/febs.12734>
- [33] Hänsel-Hertsch, R., Di Antonio, M., & Balasubramanian, S. (2017). DNA G-quadruplexes in the human genome: detection, functions and therapeutic potential. *Nat Rev Mol Cell Biol*, 18(5), 279-284. doi: <https://doi.org/10.1038/nrm.2017.3>
- [34] Zhao, D., Dong, X., Jiang, N., Zhang, D., & Liu, C. (2014). Selective recognition of parallel and anti-parallel thrombin-binding aptamer G-quadruplexes by different fluorescent dyes. *Nucleic Acids Research*, 42(18), 11612-11621. doi: <https://doi.org/10.1093/nar/gku833>
- [35] Wang, J., Wang, Y., Liu, S., Wang, H., Zhang, X., Song, X., Yu, J., & Huang, J. (2019) Primer remodeling amplification-activated multisite-catalytic hairpin assembly enabling the concurrent formation of Y-shaped DNA nanotorches for the fluorescence assay of ochratoxin A. *Analyst*, 144(10), 3389-3397. doi: <https://doi.org/10.1039/C9AN00316A>
- [36] Yuan, X., Chen, S., Li, S., Liu, Q., Kou, M., Xu, T., Luo, H., Huang, K., & Zhang, M. (2019). Enzymatic Reaction Modulation of G-Quadruplex Formation for the Sensitive Homogeneous Fluorescence Sensing of Cholinesterase and Organophosphate Pesticides. *Analytical Methods*, 11(7), 980-988. doi: <https://doi.org/10.1039/c8ay01996g>
- [37] Yao, Y., Liu, Y., Zhang, H., & Wang, X. (2019). A highly sensitive and low-background fluorescence assay for pesticides residues based on hybridization chain reaction amplification assisted by magnetic separation. *Methods and Applications in Fluorescence*, 7(3). <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2050-6120/ab1e7a/meta>
- [38] Kachalkin, A. K., Rumshtein, V., Minkova, A. P., Petrukhin, V. I., Suvorov, V. M., Horvath, D., & Yutlandov, I. A. (1979). Temperature breaking of hydrogen bonds in water on negative-pion capture by hydrogen. *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* 77, 26-30. http://jetp.ras.ru/cgi-bin/dn/e_050_01_0012.pdf
- [39] Ohtaki, H. (2003). Effects of Temperature and Pressure on Hydrogen Bonds in Water and in Formamide. *Journal of Molecular Liquids*, 103, 3-13. doi: [https://doi.org/10.1016/S0167-7322\(02\)00124-1](https://doi.org/10.1016/S0167-7322(02)00124-1)

- [40] Avagliano, D., Tkaczyk, S., Sánchez-Murcia, P. A., & González, L. (2020). Enhanced Rigidity Changes Ultraviolet Absorption: Effect of a Merocyanine Binder on G-Quadruplex Photophysics. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 11(23), 10212–10218. doi: <https://doi.org/10.1021/acs.jpcllett.0c03070>
- [41] Banerjee, S., Kumar Verma, P., Kumar Mitra, R., Basu, G., & Kumar Pal, S. (2012). Probing the Interior of Self-Assembled Caffeine Dimer at Various Temperatures. *Journal of Fluorescence*, 22(2), 753–69. doi: <https://doi.org/10.1007/s10895-011-1011-3>
- [42] Hofmann, L., & Palczewski, K. (2015). Advances in understanding the molecular basis of the first steps in color vision. *Progress in retinal and eye research*, 49, 46–66. doi: <https://doi.org/10.1016/j.preteyeres.2015.07.004>
- [43] Dresch, B. (2016). Colour perception across the species. *HAL*. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01249428/document>
- [44] Milne, B., Toker, Y., Rubio, A. & Brøndsted, S. N. (2015). Unraveling the Intrinsic Color of Chlorophyll. *Angewandte Chemie. International Edition* 54(7), 2170–2173. doi: <https://doi.org/10.1002/anie.201410899>
- [45] Prah, S. (2017). Chlorophyll a. *OMCL*. <https://omlc.org/spectra/PhotochemCAD/html/122.html>
- [46] Radice, M., & Vidari, G. (2007). Caracterización fitoquímica de la especie *Ilex guayusa* Loes y elaboración de un prototipo de fitofármaco de interés comercial. *La Granja*, 6(2), 3. doi: <https://doi.org/10.17163/lgr.n6.2007.01>
- [47] Rebolo López, S. (2007). Estudio de la composición polifenólica de vinos tintos gallegos con D.O.: Ribeiro, Valdeorras y Ribeira Sacra (Thesis). Universidad Santiago de Compostela, Lugo. https://minerva.usc.es/xmlui/bitstream/handle/10347/2353/9788497509435_content.pdf;sequence=1
- [48] Chepkoech Kilele, J., Chokkareddy, R., Rono, N., & Redhi, G. G. (2020). A novel electrochemical sensor for selective determination of theophylline in pharmaceutical formulations. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 111, 228–238. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2020.05.007>
- [49] McKeague, M. & Derosa, M. C. (2012). Challenges and opportunities for small molecule aptamer development. *J Nucleic Acids*. 2012. doi: <https://doi.org/10.1155/2012/748913>
- [50] Komes, D., Horžić, D., Belščak, A., Kovačević Ganič, K., & Baljak, A. (2009). Determination of Caffeine Content in Tea and Maté Tea by Using Different Methods. *Czech Journal of Food Sciences*, 27, 213–16. doi: <https://doi.org/10.17221/612-cjfs>
- [51] Feng, S, Che, X., Que, L., Chen, C., & Wang, W. (2016). Rapid detection of theophylline using aptamer-based nanopore thin film sensor. *IEEE*, 1-3. doi: <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2016.7808959>
- [52] Yemele Tajew, K., Ymele, E., Zambou Jiokegn, S. L., & Kenfack Tonle, I. (2018). Electrochemical Sensor for Caffeine Based on a Glassy Carbon Electrode Modified with an Attapulgitite/Nafion Film. *Electroanalysis*, 31(2), 350–356. doi: <https://doi.org/10.1002/elan.201800621>
- [53] Sarath Babu, V. R, Patra, S., Karanth, N. G., Kumar, M. A., Thakur, M. S. (2007). Development of a biosensor for caffeine. *Anal Chim Acta*, 582(2), 329–34. doi: <https://doi.org/10.1016/j.aca.2006.09.017>
- [54] Du, C., Ma, C., Gu, J., Li, L., & Chen, G. (2020). Fluorescence Sensing of Caffeine in Tea Beverages with 3,5-diaminobenzoic Acid. *Sensors*, 20(3), 819. doi: <https://doi.org/10.3390/s20030819>
- [55] Csótó, M. (2015). Mobile Devices in Agriculture: Attracting New Audiences or Serving the Tech-Savvy. *Journal of Agricultural Informatics*, 6(3). doi: <https://doi.org/10.17700/jai.2015.6.3.227>
- [56] Griesche, C., Baeumner, A. J. (2020). Biosensors to support sustainable agriculture and food safety. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 128, 115906. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trac.2020.115906>
- [57] El-Sharkawy, M. A. (2006). Utility of Basic Research in Plant/Crop Physiology in Relation to Crop Improvement: A Review and a Personal Account. *Braz. J. Plant Physiol*, 18(4), 419–446. doi: <https://doi.org/10.1590/S1677-04202006000400001>
- [58] Berbiye, I. Y. (2014). *Raw Cocoa* (*Theobroma cacao* L.) *Quality Parameters - with special Reference to West Africa* [Doctoral dissertation, University of Hamburg].
- [59] V. Jegadeeswari, & Arunkumar, K. (2019). Evaluating the processed beans of different cocoa (*Theobroma cacao* L.) accessions for quality parameters. *Journal of Phytology*, 11(1), 01–04. doi: <https://doi.org/10.25081/jp.2019.v11.3827>



- [60] Golawska, S., Sprawka, I., Lukasik, I., & Gołowski, A. (2014). Are naringenin and quercetin useful chemicals in pest-management strategies. *Journal of Pest Science*, 87(1), 173–180. doi: <https://doi.org/10.1007/s10340-013-0535-5>
- [61] Sosa, M. E., Guerreiro, E., Giordano, O. S., & Tonn, C. E. (2000). Bioactividad de flavonoides sobre larvas de *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae). *Rev. Soc. Entomol. Argent.*, 59(1–4), 179–184. <https://www.biotaxa.org/RSEA/article/view/32428>

Ciencia ciudadana e interacciones entre aves nectarívoras y plantas de páramo en el Parque Nacional Cajas

Xavier Iñiguez Vela^{1,2,*}, Juan Manuel Aguilar Ullauri¹

¹Universidad del Azuay, Av. 24 de Mayo 7-77 y Hernán Malo, Cuenca, Ecuador.

²Consultores Ambientales Gesnam, Sucre 3-12 y Tomás Ordóñez, Cuenca, Ecuador.

*Autor para Correspondencia / Corresponding Author, e-mail: xiniguezvela134@gmail.com

Citizen science and interactions between nectarivorous birds and paramo plants at Cajas National Park

Resumen

En este estudio se analiza la red de interacciones entre aves nectarívoras y plantas de páramo en el Parque Nacional Cajas, Azuay, Ecuador, utilizando información de ciencia ciudadana de la plataforma eBird. La información para el análisis fue extraída de fotografías y videos disponibles en esta plataforma. En total se identificaron 24 interacciones entre ocho especies de aves y 14 géneros de plantas. A nivel de red se calculó el índice de conectancia (C), mientras que, a nivel de especie, se calculó el grado (D) o número de interacciones de cada especie. Se utilizó el software R para visualizar la red de interacción y calcular cada índice. Se encontró que el colibrí endémico *Metalura gorjivioleta*, *Metallura baroni*, y el Picoespina Dorsizaul, *Chalcostigma stanleyi*, así como el género *Gynoxys*, mostraron una mayor cantidad de interacciones, sugiriendo su importancia en los ecosistemas del Parque Nacional Cajas.

Palabras clave: Conectancia, eBird, grado, interacciones en el páramo, nectarívoro, red trófica, topología de la red.

Abstract

We analyzed the interactions between nectarivorous birds and paramo plants at Cajas National Park, Azuay, Ecuador, using citizen science information from the eBird platform. Our analysis was based on clues extracted from photographs and videos available on this platform. A total of 24 interactions were identified between eight nectarivorous birds and 14 plant genera. At the network level, we calculated connectance (C), and at the species level, we calculated degree (D), or the number of interactions of each species. We used the platform R to visualize the interactions network and calculate each index. We found that the endemic hummingbird Violet-throated Metaltail, *Metallura baroni*, and Blue-mantled Thornbill, *Chalcostigma stanleyi*, as well as genus *Gynoxys*, showed the majority of interactions, suggesting their importance for the ecosystems of Cajas National Park.

Keywords: Connectance, degree, eBird, nectarivorous, network topology, paramo interactions, trophic network.



Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /
Edited by:
Elisa Bonaccorso

Recibido /
Received:
25/05/2021

Aceptado /
Accepted:
04/04/2022

Publicado en línea /
Published online:
16/05/2022



La ciencia ciudadana tiene como objetivo el involucramiento de la sociedad para generar datos en varias ramas de la investigación. Entre estas ramas están los estudios ecológicos y de biodiversidad procedentes de grupos de colaboradores, expertos voluntarios o aquellos que disfrutan de la observación directa de la naturaleza. Estas personas depositan sus observaciones en plataformas web, generando información sobre presencia de especies en lugares inusuales. Esta información puede ayudar a la creación de mapas de distribución de especies, el estudio de la migración o cambios en distribución, los cuales pueden contribuir al conocimiento y la conservación de la biodiversidad [1-4].

La plataforma eBird del Laboratorio de Ornitología de la Universidad de Cornell, es una de las más utilizadas para la ciencia ciudadana ornitológica. Esta plataforma permite a cualquier observador registrar aves durante todo el año y en cualquier lugar del mundo para compartirlas a través de listados, fotos, audio y video, con científicos y otros miembros de la comunidad ornitológica, así como público en general [1, 5, 6]. Sin embargo, los aportes de los observadores están enfocados a registros de presencia, dejando en segundo plano información detallada sobre la ecología de las especies, como, por ejemplo, las interacciones entre aves y plantas.

Las interacciones entre los elementos de un ecosistema ayudan al planteamiento de estrategias de conservación, ya que abarcan el sistema global en el que se encuentra y su funcionamiento [7-9]. Entre estas, la polinización realizada por animales es un servicio ecológico que contribuye directamente al crecimiento de bosques y poblaciones de plantas, e indirectamente, a la captura de carbono, la calidad y la cantidad de agua [10-13].

Los altos Andes albergan especies raras, adaptadas a las condiciones del páramo, como bajas temperaturas y vientos constantes [14, 15]. Existe un amplio conocimiento en términos de su taxonomía y distribución, pero la información sobre sus interacciones con otras especies, incluyendo generalismo y especialismo, es todavía insuficiente [16-18]. Por otra parte, las interacciones de polinización de la comunidad de colibríes han sido analizadas en términos de estructura y funcionalidad [19], pero aún queda mucho por comprender sobre las funciones de otras aves nectarívoras en estos ecosistemas complejos y amenazados [18, 20].

Este trabajo intenta explorar la estructura de las interacciones entre las aves nectarívoras y plantas de páramo del Parque Nacional Cajas (PNC), en el sur de Ecuador, con base en datos de ciencia ciudadana. Específicamente, se analizó la topología de la red de interacciones entre aves nectarívoras y plantas, utilizando registros de la plataforma de ciencia ciudadana eBird (<https://ebird.org>), a través de la revisión de fotos y videos, con la finalidad de contribuir a entender esta estructura.

El PNC es un sistema de montañas ubicado a 35 km al oeste de la ciudad de Cuenca, en la provincia del Azuay, entre los 3160 m s.n.m y 4450 m s.n.m. Su biodiversidad incluye 157 especies de aves, una muestra representativa de los ecosistemas altoandinos que lo convierte en un destino atractivo para aficionados e investigadores [21].

Para definir la estructura de la red de aves nectarívoras y plantas del páramo del PNC se recopiló información de la plataforma eBird entre agosto 2020 y julio 2021 (Tabla 1).



Para ello se inspeccionaron aquellas fotografías y videos en los que se pudo identificar tanto el ave como el género de planta con el que interactuaba, considerando registros por encima de 3650 m s.n.m. La búsqueda estuvo enfocada en el registro de cada interacción, considerando solo la primera fotografía o video en donde se la identificó. Cuando la misma interacción era registrada por diferentes observadores, esta se consideraba como una sola.

Tabla 1. Enlaces de la plataforma eBird utilizados para la revisión de archivos fotográficos o de video en los que se registraron las interacciones entre aves nectarívoras y plantas de páramo en el Parque Nacional Cajas, Azuay.

Enlaces eBird	
https://ebird.org/checklist/S91765292	https://ebird.org/checklist/S7997623
https://ebird.org/checklist/S78185766	https://ebird.org/checklist/S72108145
https://ebird.org/checklist/S73631256	https://ebird.org/checklist/S7344323
https://ebird.org/checklist/S87868194	https://ebird.org/checklist/S40903418
https://ebird.org/checklist/S62650470	https://ebird.org/checklist/S78185766
https://ebird.org/checklist/S61806609	https://ebird.org/checklist/S55868579
https://ebird.org/checklist/S59193928	https://ebird.org/checklist/S61691392
https://ebird.org/checklist/S65126228	https://ebird.org/checklist/S40197885
https://ebird.org/checklist/S31313272	https://ebird.org/qc/checklist/S54186589
https://ebird.org/checklist/S65382486	https://ebird.org/checklist/S50046859
https://ebird.org/checklist/S72263692	https://ebird.org/checklist/S65382486
https://ebird.org/checklist/S64978494	https://ebird.org/checklist/S7997623
https://ebird.org/checklist/S72108145	https://ebird.org/checklist/S72172813
https://ebird.org/checklist/S34622332	https://ebird.org/checklist/S82538445
https://ebird.org/checklist/S50046859	https://ebird.org/checklist/S58832540
https://ebird.org/checklist/S59193928	https://ebird.org/checklist/S67570629
https://ebird.org/checklist/S34407583	https://ebird.org/checklist/S68783162
https://ebird.org/checklist/S71471660	https://ebird.org/checklist/S31313272
https://ebird.org/checklist/S31343070	https://ebird.org/checklist/S31313315
https://ebird.org/checklist/S36850087	https://ebird.org/checklist/S58782458
https://ebird.org/checklist/S65144195	https://ebird.org/checklist/S65131622
https://ebird.org/checklist/S77400347	https://ebird.org/checklist/S40903418
https://ebird.org/checklist/S62404444	https://ebird.org/checklist/S36987302
https://ebird.org/checklist/S60351219	https://ebird.org/checklist/S40037162
https://ebird.org/checklist/S65131615	https://ebird.org/checklist/S41041296

Enlaces eBird	
https://ebird.org/checklist/S64599396	https://ebird.org/checklist/S49708897
https://ebird.org/checklist/S58782458	https://ebird.org/checklist/S36877152
https://ebird.org/checklist/S31343135	https://ebird.org/checklist/S62650470
https://ebird.org/checklist/S53198394	

Se depuraron las observaciones considerando las especies nectarívoras presentes en este ecosistema, de acuerdo a lo propuesto en González et al. (2019), Aguilar & Iñiguez (2015) y Astudillo *et al.* (2015). Dada la dificultad de identificación en algunos de los archivos revisados, la identificación de las plantas se trabajó a nivel de género. Aunque la mayoría de géneros de plantas presenta una sola especie en el PNC, esta metodología presenta limitantes cuando se registran las interacciones con especies de *Puya* (Bromeliaceae) y *Gynoxys* (Asteraceae), para las que en el PNC se han reportado tres y cuatro especies, respectivamente [22].

La red de interacciones entre nectarívoros y plantas se calculó en el software R [23], RStudio Version 1.4.1106, con el paquete bipartite Version 2.16: Analysis of bipartite ecological webs, un paquete que incluye funciones para visualizar redes con dos niveles tróficos, e índices que calculan la estructura topológica de la red y la contribución de las especies [24]. La red se generó tomando en cuenta solamente la presencia o ausencia de la interacción (1 o 0, respectivamente), colocando en columnas las especies del nivel trófico superior (aves nectarívoras) y en filas aquellas del nivel trófico inferior (plantas) [24, 25]. Tratándose de un análisis exploratorio, cualitativo, se calculó solamente el índice de conectancia (Connectance, C), a nivel de red, y el índice grado (Degree, D) a nivel de especie. La conectancia mide la relación entre las interacciones observadas y el total de interacciones posibles dentro de la red, pudiendo considerar solo la presencia de una interacción y no la frecuencia con la que ocurre; el grado es el número de interacciones que tiene cada especie [26, 27].

En total se identificaron ocho especies de aves nectarívoras, seis colibríes (familia Trochilidae) y dos Tráupidos (familia Thraupidae), interactuando con 14 géneros de plantas (Fig. 1). De las 112 interacciones posibles entre los nectarívoros y los géneros de plantas identificados, se registraron 24, resultando en una conectancia de $C = 0,21$. Dos especies de colibríes, *M. baroni* y *C. stanleyi*, y el género *Gynoxys*, mostraron una mayor cantidad de enlaces (grado) (Fig. 1).

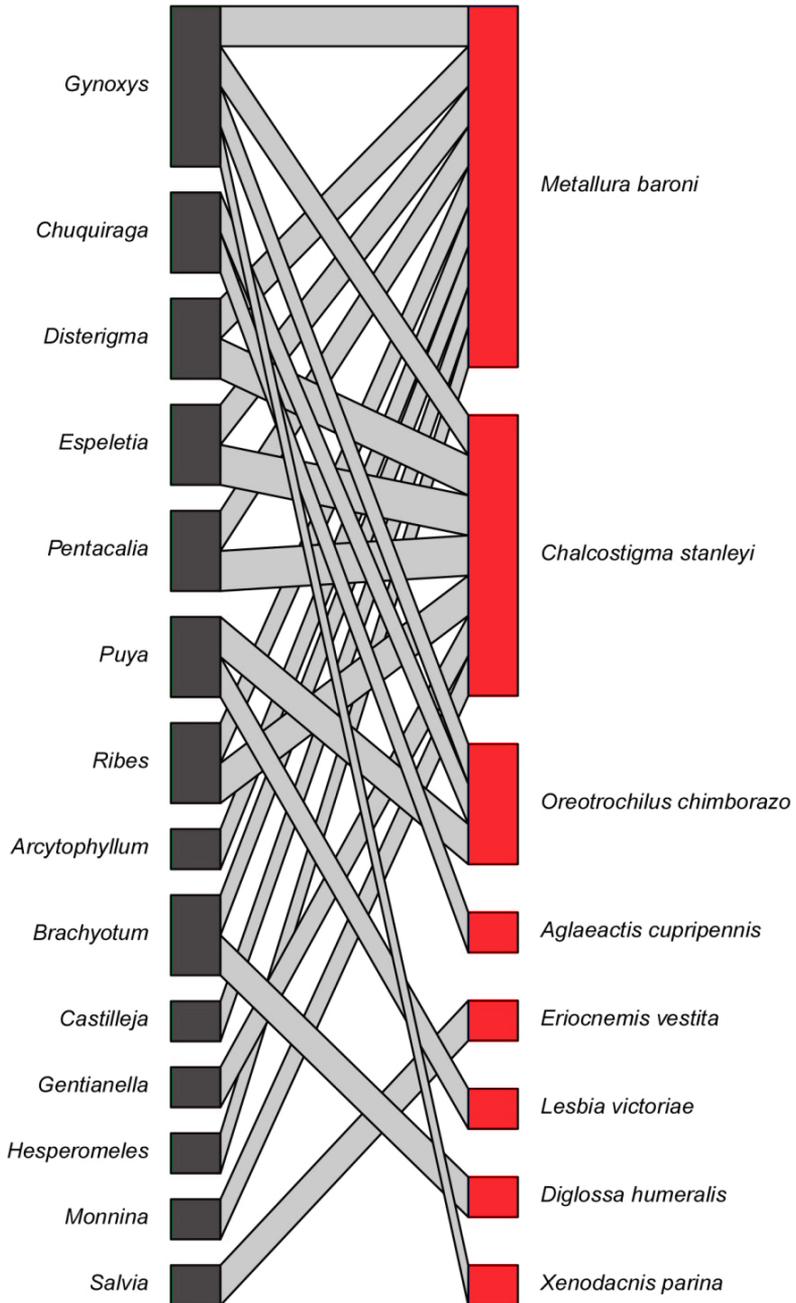


Figura 1. Red de interacciones entre aves nectarívoras y plantas de páramo en el Parque Nacional Cajas, basada en registros de ciencia ciudadana (eBird). Grado de interacción: *Metallura baroni* (9); *Chalcostigma stanleyi* (7); *Oreotrochilus Chimborazo* (3); las aves restantes interactuaron con un solo género de planta.



Este es el primer acercamiento del uso de ciencia ciudadana para identificar interacciones entre plantas de páramo y aves nectarívoras en el PNC. El valor de conectancia encontrado en este estudio ($C = 0,21$) resultó similar a lo encontrado por Pelayo *et al.* (2021) en el páramo de Piedras Blancas, en el Parque Nacional La Culata, Venezuela, en alturas superiores a los 4000 m s.n.m. En ese estudio se encontraron valores de conectancia de $C = 0,17$, $C = 0,20$, $C = 0,20$ y $C = 0,34$ en diferentes localidades [32]. Ramírez en 2013 calculó valores similares ($C = 0,17$) en el Parque Nacional Natural (PNN) Munchique, Colombia, entre los 2200 m s.n.m. y 2500 m s.n.m. [26]. Sin embargo, Córdova y Fajardo en 2018 encontraron valores más altos ($C = 0,533$ y $C = 0,375$) entre 2200 m s.n.m. y 3940 m s.n.m., en la provincia del Azuay, Ecuador [30]. De manera similar, Gonzalez *et al.* (2019) encontraron una mayor conectancia en un bosque achaparrado de los Andes centrales peruanos ($C = 0,385$), a 3800 m s.n.m. [31]. Si bien el cálculo del valor de conectancia no considera las frecuencias de las interacciones en este estudio, a diferencia de los mencionados, este puede también estar influenciado por el esfuerzo de muestreo, la riqueza de especies y el nivel de disturbio o intervención antrópica en el área donde se realiza la red de interacciones [19, 26, 28, 29]. También es importante resaltar que estos estudios se realizan en rangos altitudinales diversos y en ecosistemas que, aunque están en la misma región, tienen composiciones de especies diferentes, complicando su comparación.

Los resultados en relación al número de géneros de plantas con que interactúan las aves sugieren que el colibrí endémico *Metalura Gorjivioleta M. baroni* y el Picoespina *Dorsizaul C. stanleyi*, pueden ser especies importantes en la red de interacciones del PNC. Estos son resultados importantes a tomar en cuenta para futuras investigaciones que estén enfocadas en generar estrategias de conservación y rehabilitación de ecosistemas de páramo en el PNC y zonas adyacentes.

Es interesante tomar en cuenta que cuatro especies de aves interactuaron con *Gynoxys* (Fig. 1), buscando artrópodos y néctar en las hojas, y ocasionalmente visitando sus flores. El género *Gynoxys* es importante para la presencia y abundancia de varias especies de aves [33], siendo una fuente de recursos significativa para la avifauna de los páramos en el PNC [33, 20]. Si bien los programas de reforestación con plantas del género *Polylepis* han cobrado importancia en los altos Andes [33], resultados como los encontrados en este estudio para el género *Gynoxys* sugieren que deberían dedicarse mayores esfuerzos para generar conocimiento sobre especies de plantas que probablemente puedan jugar un rol esencial en el mantenimiento y conservación de los ecosistemas de páramo.

Las plataformas digitales de ciencia ciudadana generan mucha información, aunque, como en este caso, dicha información está sistematizada para trabajar registros de especies, limitando el estudio a datos de los contribuyentes que comparten sus fotografías o videos en la plataforma, encontrando que los colibríes son un grupo que destaca en interacciones. Esta situación limitó el análisis únicamente a índices que pueden considerar presencia de interacciones, dejando de lado conclusiones más fuertes que se generan de un análisis sistemático que considera la frecuencia de interacciones. Además, podría existir un sesgo en la cantidad de información que se puede obtener de cada especie, dado el interés ornitológico por cada una de ellas y por el área de estudio. Se recomienda utilizar las plataformas digitales especializadas y considerar describir comportamientos e interacciones de interés que detallen algo adicional al registro de una especie.



AGRADECIMIENTOS

A la Universidad del Azuay y su programa de maestría en Estudios Socioambientales, a la Universidad de Cornell, la plataforma eBird y los distintos observadores que comparten sus registros en la web. A Paul Molina Abril por sus comentarios importantes sobre registros en los páramos del PNC, y al equipo de revisores y editores de la revista *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías* por sus comentarios para la mejora de este manuscrito.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Xavier Iñiguez Vela y Juan Manuel Aguilar Ullauri contribuyeron en la totalidad de la investigación, incluyendo su concepción, metodología, búsqueda y elaboración de la base de datos, análisis estadístico, tablas y figuras, la redacción y revisión del manuscrito.

CONFLICTO DE INTERESES

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

REFERENCIAS

- [1] Betancur, E., y Cañón, J. E. (2016). La ciencia ciudadana como herramienta de aprendizaje significativo en educación para la conservación de la biodiversidad en Colombia. *Revista Científica en Ciencias Ambientales y Sostenibilidad CAS*, 3(2), 1–15. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/287199617_Ciencia_Ciudadana_una_herramienta_para_impulsar_la_sostenibilidad_en_el_ambito_local
- [2] Borsellino, L. (2017). El uso de la fotografía y la ciencia ciudadana como herramientas para la conservación de la biodiversidad. *Revista Photo y Documento*, 3. Recuperado de https://redib.org/Record/oai_articulo1254789
- [3] Pocock, M. J. O., Chandler, M., Bonney, R., Thornhill, I., Albink, A., August, T., Bachman, S., Brown, P. M. J., Fernandes Cunha, D. G., Grez, A., Jackson, C., Peters, M., Romer Rabarjaonkk, N., Roy, H. E., Zaviero, T. y Danielsen, F. (2018). A vision for global biodiversity monitoring with citizen science. *Advances in Ecological Research*, 59, 169–223. doi: <https://doi.org/10.1016/bs.aecr.2018.06.003>
- [4] Tejada, I. y Medrano, F. (2018). El potencial de la ciencia ciudadana para el estudio de las aves urbanas en Chile. *Revista Diseño Urbano y Paisaje*, 33, 59–66. Recuperado de http://dup.ucentral.cl/dup_33/ivo_tejeda.pdf
- [5] Tejada, I. y Medrano, F. (2018). eBird como una herramienta para mejorar el conocimiento de las aves de Chile. *Revista Chilena de Ornitología*, 24(2), 85–94. Recuperado de http://redobservadores.cl/wp-content/uploads/2019/01/06_Tejeda-y-Medrano-2018_e-Bird_RChO_2018.pdf
- [6] eBird. (2021). *Acera de eBird*. Recuperado en mayo de 2021 de <https://ebird.org/about>
- [7] Mouillot, D., Bellwood, D. R., Baraloto, C., Chave, J., Galzin, R., Harmelin-Vivien, M., Kulbicki, M., Lavergne, S., Lavelle, S., Mouquet, N., Timothy Paine, C. E., Renaud, J. y Thuiller, W. (2013). Rare species support vulnerable functions in high-diversity ecosystems. *PLoS Biol*, 11(5), e1001569. doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1001569>
- [8] Owen, N. R., Gumbs, R., Gray, C. L. y Faith, D. P. (2019). Global conservation of phylogenetic diversity captures more than just functional diversity. *Nature Communications* 10:859. doi: <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05126-3>
- [9] Runge, C. A., Withey, J. C., Naugle, D. E., Fargione, J. E., Helmstedt, K. J., Larsen, A. E., Martinuzzi, S. y Tack, J. D. (2019). Single species conservation as an umbrella for management of landscape threats. *PLoS ONE*, 14(1), e0209619. doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0209619>
- [10] Montagnini, F. y Jordan, C. (2005). Characteristics of tropical forests. *Tropical forest ecology. The basis for conservation and management*. 19-73. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/290486782_Characteristics_of_tropical_forests
- [11] Aizen, M. y Chacoff, N. (2009). Las interacciones planta-animal como servicio ecosistémico: el caso del mutualismo de polinización. En Medel, R., Aizen, M., y Zamora, R. (Eds.). *Ecología y evolución de interacciones planta-animal: conceptos y aplicaciones*. Talleres de Salesianos Impresores S. A. pp. 313–327.
- [12] Ghazoul, J. (2015). Forest goods and services. En Ghazoul, J. *Forests a very short introduction*. Oxford University Press.
- [13] Sosenski, P. y Domínguez, C. (2018). El valor de la polinización y los riesgos que enfrenta como servicio ecosistémico. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 89, 961–970. doi: <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2018.3.2168>
- [14] Cruden, R. W. (1972). Pollinators in high-elevation ecosystems: relative effectiveness of birds and bees. *Science*, 176(4042), 1439–1440. doi: <https://doi.org/10.1126/science.176.4042.1439>
- [15] Dellinger, A. S., Penneys, D. S., Staedler, Y. M., Fragner, L., Weckwerth, W. y Schönenberger, J. (2014). A specialized bird pollination system with a bellows mechanism for pollen transfer and staminal food body rewards. *Current Biology*, 24(14), 1–5. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cub.2014.05.056>
- [16] Rojas-Nossa, S. (2007). Estrategias de extracción de néctar por Pinchafleres (Aves: *Diglossa* y *Diglossopsis*) y sus efectos sobre la polinización de plantas de los altos Andes. *Ornitología Colombiana*, 5, 21–39. Recuperado de <https://asociacioncolombianadeornitologia.org/wp-content/uploads/revista/oc5/pinchafleres21-39.pdf>
- [17] Herzog, S. y Kattan, G. (2012). Patrones de diversidad y endemismo en las aves de los Andes tropicales. En Herzog, S., Martínez, R., Jorgensen, P. y Tiessen, H. (Eds.). *Cambio climático y biodiversidad en los Andes tropicales*. Instituto Interamericano para la Investigación del Cambio Global (IAI) y Comité Científico sobre Problemas del Medio Ambiente (SCOPE). pp. 287–305.



- [18] Aguilar, J. M. y Tinoco, B. A. (2017). Ecología de polinización de *Axinaea meriania* en los altos Andes del sur del Ecuador. Características de su néctar y aves polinizadoras. *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías*, 9(15), 61–65. doi: <http://doi.org/10.18272/aci.v9i15.757>
- [19] Tinoco, B. A., Graham, C. H., Aguilar, J. M. y Schleuning, M. (2016). Effects of hummingbird morphology on specialization in pollination networks vary with resource availability. *Oikos*, 126: 52–60. doi: <https://doi.org/10.1111/oik.02998>
- [20] Aguilar, J. M. y Iñiguez, X. (2015). Hábitos alimentarios de *Xenodacnis (Xenodacnis parina)* en los páramos del sur del Ecuador. *Ornitología Neotropical*, 26(2), 211–217. Recuperado de <https://journals.sfu.ca/orneo/index.php/orneo/article/view/29/20>
- [21] Astudillo, P. X., Tinoco, B. A. y Siddons, D. C. (2015). The avifauna of Cajas National Park and Mazán Reserve, southern Ecuador, with notes on new records. *Cotinga*, 37, 2–12. Recuperado de <https://www.neotropicalbirdclub.org/wp-content/uploads/2020/06/C37-Astudillo-et-al.pdf>
- [22] Minga, D., Ansaloni, R., Verdugo, A. y Ulloa Ulloa, C. (2016). *Flora del páramo del Cajas, Ecuador*. Imprenta Don Bosco.
- [23] R Development Core Team. (2012). *R: a language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. Recuperado de <http://www.R-project.org/>
- [24] Dormann, C. F., Gruber, B. y Fründ, J. (2008). Introducing the bipartite package: analysing ecological networks. *R News*, 8(2), 8–11. Recuperado de https://www.r-project.org/doc/Rnews/Rnews_2008-2.pdf
- [25] Dormann, C. F., Fruend, J. y Gruber, B. (2021). *Package 'bipartite'*. Recuperado de <https://cran.r-project.org/web/packages/bipartite/index.html>
- [26] Ramírez, M. B. (2013). Redes de interacción mutualista colibrí-flor en el Parque Nacional Natural Munchique: ¿La pérdida de un colibrí endémico y en peligro crítico de extinción, acarrea el colapso del sistema? (Tesis de Magister). Universidad Nacional de Colombia. Recuperado de <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/20678>
- [27] Martínez-Falcón, A. P., Martínez-Adriano, C. A. y Dáttilo, W. (2019) Redes complejas como herramientas para estudiar la diversidad de las interacciones ecológicas. En Moreno, C. E. (Ed.). *La biodiversidad en un mundo cambiante: Fundamentos teóricos y metodológicos para su estudio*. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo/LiberMex. pp. 265–283
- [28] Banasek-Richter, C., Bersier, L. F., Cattin, M. F., Baltensperger, R., Gabriel, J. P., Merz, Y., Ulanowicz, R. E., Tavares, A. F., Williams, D. D., De Ruiter, P. C., Winemiller, K. O. y Naisbit, R. E. (2009). Complexity in quantitative food webs. *Ecology*, 90(6), 1470–1477. doi: <https://doi.org/10.1890/08-2207.1>
- [29] Heleno, R., Devotob, M. y Pocock, M. (2012). Connectance of species interaction networks and conservation value: Is it any good to be well connected? *Ecological Indicators*, 14, 7–10. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.06.032>
- [30] Córdova, M. y Fajardo, P. (2018). Efectos de la disponibilidad de *Oreocallis grandiflora* (Lam.) R. Br. (Proteaceae) en las redes de interacción de polinización de colibríes en matorrales montano andinos al sur del Ecuador (Tesis de Biólogo). Universidad del Azuay. Recuperado de <https://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/8089>
- [31] Gonzalez, O., Díaz, C. y Britto, B. (2019). Assemblage of nectarivorous birds and their floral resources in an Elfin Forest of the central Andes of Peru. *Ecología Aplicada*, 18(1), 21–35. doi: <http://doi.org/10.21704/rea.v18i1.1302>
- [32] Pelayo, R. C., Llambi, L. D., Gámez, L. E., Barrios, Y. C., Ramirez, L. A., Torres, J. E. y Cuesta, F. (2021). Plant phenology dynamics and pollination networks in summits of the High Tropical Andes: A baseline for monitoring climate change impacts. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 9:679045. doi: <https://doi.org/10.3389/fevo.2021.679045>
- [33] Tinoco, B. A., Astudillo, P. X., Latta, S., C., Strubbe, D., & Graham, C. H. (2013). Influence of Patch Factors and Connectivity on the Avifauna of Fragmented Polylepis Forest in the Ecuadorian Andes. *Biotropica*, 45(5), 602–611. doi: <https://doi.org/10.1111/btp.12047>

Estudio preliminar de la microbiota foliar de banano y su variación en presencia del patógeno *Sigatoka Negra (Pseudocercospora fijiensis)*

Alejandra Paladines-Montero¹, Claudia Zapata¹, Darío X. Ramírez-Villacís^{1,2} y Antonio León-Reyes^{1,3*}

¹Universidad San Francisco de Quito USFQ, Colegio de Ciencias e Ingeniería-Agronomía, Quito, Ecuador; Laboratorio de Biotecnología Agrícola y de Alimentos.

²Netherlands Institute of Ecology NIOO-KNAW, Wageningen, The Netherlands; Laboratory of Microbial Ecology.

³Department of Biology, University of North Carolina, Chapel Hill, NC 27599.

*Autor de correspondencia / Corresponding Autor, e-mail: aleon@usfq.edu.ec

Preliminar study on the foliar microbiome in banana and its variation in presence of Black Sigatoka pathogen (*Pseudocercospora fijiensis*)

Abstract

We describe the bacterial and fungal microbiome of the banana (*Musa x paradisiaca*) leaf in healthy and necrotic phases of Black Sigatoka or black leaf streak disease (*Pseudocercospora fijiensis*), evaluated under organic and conventional agronomic management in El Oro province, Ecuador. Samples were collected for subsequent DNA sequencing and analysis of the 16S (V3-V4) and ITS markers. This study suggests that the fungal diversity from the organic farming system decreased due to the pathogen's presence, while in the conventional farming system the diversity increased. Also, we observed that an amplicon sequence variant (ASV) from the genus *Pseudomonas* was more abundant in the healthy organic leaf. This ASV corresponded to the *Pseudomonas fluorescens* clade, a known beneficial taxon for plants. The banana's phyllosphere endophyte microbiome depends on the cultivation system, and diseased conditions significantly change the microbiome in the presence of black leaf streak disease.

Keywords: necrotic, sequencing, diversity, ASV, phyllosphere, diversity, pathogen

Resumen

Se describe el perfil taxonómico bacteriano y fúngico de la hoja de banano (*Musa x paradisiaca*) en presencia y ausencia de la enfermedad Sigatoka Negra (*Pseudocercospora fijiensis*), evaluando manejos agronómicos orgánico y convencional en la provincia de El Oro, Ecuador. Las muestras recolectadas se sometieron a secuenciación de ADN y análisis en las regiones 16S (V3-V4) e ITS. Se observó que la microbiota fúngica de las hojas de banano del cultivo orgánico disminuyen su diversidad en presencia del patógeno, mientras que en el sistema convencional la diversidad aumenta. Además, se observa un *amplicon sequence variant* (ASV) del género *Pseudomonas* en mayor abundancia en la hoja sana orgánica. Este ASV proviene del clado de *Pseudomonas fluorescens*, un taxón conocido como benéfico para las plantas. La microbiota endófit



Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /
Edited by:
Diana Pazmiño

Recibido /
Received:
15/05/2021

Aceptado /
Accepted:
09/03/2022

Publicado en línea /
Published online:
16/05/2022



presente en la filósfera del banano depende del sistema de cultivo y la presencia del patógeno cambia significativamente la composición microbiana.

Palabras clave: necrótico, secuenciamiento, diversidad, ASV, filósfera, diversidad, patógeno

INTRODUCCIÓN

Las plantas son organismos multicelulares que proveen diversos ambientes o nichos ecológicos que son ocupados por una amplia gama de microorganismos [1], estos, a su vez forman asociaciones complejas y presentan diferentes roles en el desarrollo del hospedador entre ellos propiedades patogénicas, beneficiosas y algunos pueden no presentar un efecto directo sobre su hospedador [2]. Esto ocurre en los órganos situados bajo el suelo, al igual que los que se encuentran en la superficie. La filósfera hace referencia a las regiones aéreas de la planta, que en su mayoría son hojas [3]. En ellos habitan microorganismos en la superficie, conocidos como epífitos, así como dentro del tejido de la hoja, llamados endófitos [2].

La microbiota hace referencia al ensamblaje de microorganismos presente en un ambiente definido [4]. Ensayos de microorganismos cultivo-independientes, realizados en su mayoría en la última década, han permitido descifrar la composición taxonómica del microbioma asociado a plantas en diferentes estados y bajo varios estímulos [5]. El ensamblaje microbiano revelado en estos estudios no ocurre al azar [3], al contrario, se ha determinado que es producto de una selección derivada, principalmente, del genotipo de la planta y, posteriormente, de otros factores como estímulos bióticos y abióticos [6]. A niveles taxonómicos amplios la composición microbiana de la endósfera de la hoja presenta patrones similares entre especies y esto se diferencia significativamente del resto de la planta [7]. La comunidad bacteriana se encuentra dominada por los filos Proteobacteria y Firmicutes, mientras que la vasta mayoría de hongos que colonizan la endósfera provienen de los filos Ascomycota y Basidiomycota [1].

Datos explorados anteriormente sugieren que los microorganismos con la capacidad de colonizar la endósfera de la hoja tienen la necesidad de poseer motilidad, la habilidad de degradar la pared celular vegetal y activar en el huésped respuestas inmunitarias [7]. Se conoce que en las raíces cuando hay deficiencia de nutrientes específicos el estado inmunológico de la planta se reprime y esta recluta microorganismos creando un ensamblaje microbiano específico que incrementa la biodisponibilidad de los nutrientes en deficiencia [8, 9], moviliza los nutrientes dentro del hospedador y además puede cambiar el metabolismo de la planta mediante la excreción de moléculas para redireccionar la energía generada a otros destinos metabólicos [10].

Así mismo, la presencia de comunidades heterogéneas en la endósfera del hospedador le generan en este último modificaciones metabólicas que le confieren resistencia a patógenos además de secretar sustancias antimicrobianas que los repelen [11]. Ensamblajes microbianos específicos confieren tolerancia al estrés abiótico [12]. En conjunto, el microbioma puede modificar el proceso evolutivo de una especie incrementando el *fitness*



de la planta. En este contexto, se considera al microbioma asociado a un organismo, como un genoma extendido que juega un rol fundamental en el desarrollo del hospedador [13, 14]. Estas propiedades están bien caracterizadas en las comunidades microbianas asociadas a la raíz, tanto en la endósfera como en la rizósfera, sin embargo, en la región superior de la planta los estudios son escasos y actualmente existen muy pocos ensayos que demuestran el efecto de la microbiota de la filósfera [15, 16].

La disbiosis es la condición en la que existe un desbalance en la microbiota y este se encuentra asociado a un fenotipo enfermo [16], en varios estudios se ha encontrado que en presencia de un patógeno existe un drástico aumento de la población del filo Proteobacteria y disminución de Firmicutes [6, 16-18], además de la disminución en la diversidad [16, 17, 19]. Estos hallazgos abren puertas al desarrollo de tecnologías basadas en ensamblajes microbianos sanos que permitan revertir el estado disbiótico y le devuelvan el estado sano al hospedador [18].

El banano (*Musa spp.*) se encuentra entre los productos de mayor interés agronómico desde el punto de vista económico. Ecuador es el mayor exportador abarcando el 34% del mercado [20]. A nivel mundial los cultivos de banano Cavendish se ven afectados por el patógeno foliar más devastador para estas plantaciones *Pseudocercospora fijiensis*, antes conocido como *Mycosphaerella fijiensis*, o comúnmente denominado Sigatoka Negra, es un hongo Ascomyceto hemibiotrófico heterotálico [21]. Actualmente, el único manejo fitosanitario en plantaciones afectadas es la aplicación semanal de fungicidas sintéticos [22]. Lo que representa un porcentaje considerable de los costos de producción, además de tener como consecuencia impactos negativos a nivel ecológico y de salud pública [21, 23].

El objetivo del presente estudio es la caracterización taxonómica de la microbiota endófito de la hoja de banano en presencia y ausencia de sintomatología de Sigatoka Negra (*P. fijiensis*) contrastando manejo orgánico y convencional en la provincia de El Oro, Ecuador. Este estudio explora las poblaciones microbianas de la hoja de banano encontrando posibles controladores biológicos para el patógeno de interés.

MATERIALES Y MÉTODOS

Recolección de muestras

En el mes de mayo del 2019 se recolectaron muestras de hojas de banano de dos plantaciones localizadas en el cantón Santa Rosa, provincia de El Oro, (Fig. 1). La primera estuvo ubicada en la hacienda "Central, San José", con coordenadas 3° 21' 18.000" N y 79° 54' 5.800" E, con un manejo fitosanitario orgánico usando controladores biológicos, compostaje y fertilizantes orgánicos. La segunda plantación estuvo ubicada en la hacienda "Cueva", cuyas coordenadas son 3° 21' 33.700" N y 79° 54' 58.300" E, y se encuentra bajo manejo convencional usando fungicidas e insecticidas sintéticos de manera rotatoria, además de fertilizantes sintéticos. Se seleccionó el tercio medio de la cuarta hoja de cinco plantas que fueron muestreadas aleatoriamente para cada tratamiento. Con estas cinco muestras se realizó un *pool* para cada tratamiento, los tratamientos son: plantas con sintomatología de Sigatoka Negra y plantas asintomáticas, esto para cada

plantación (orgánico y convencional). En el campo se realizó un lavado con una solución estéril compuesta por bifosfato de sodio 45,9 mM, fosfato disódico 61,6 mM y 0,1 % Tween 20. Posteriormente, se conservó a 4°C para su transporte al laboratorio [24].

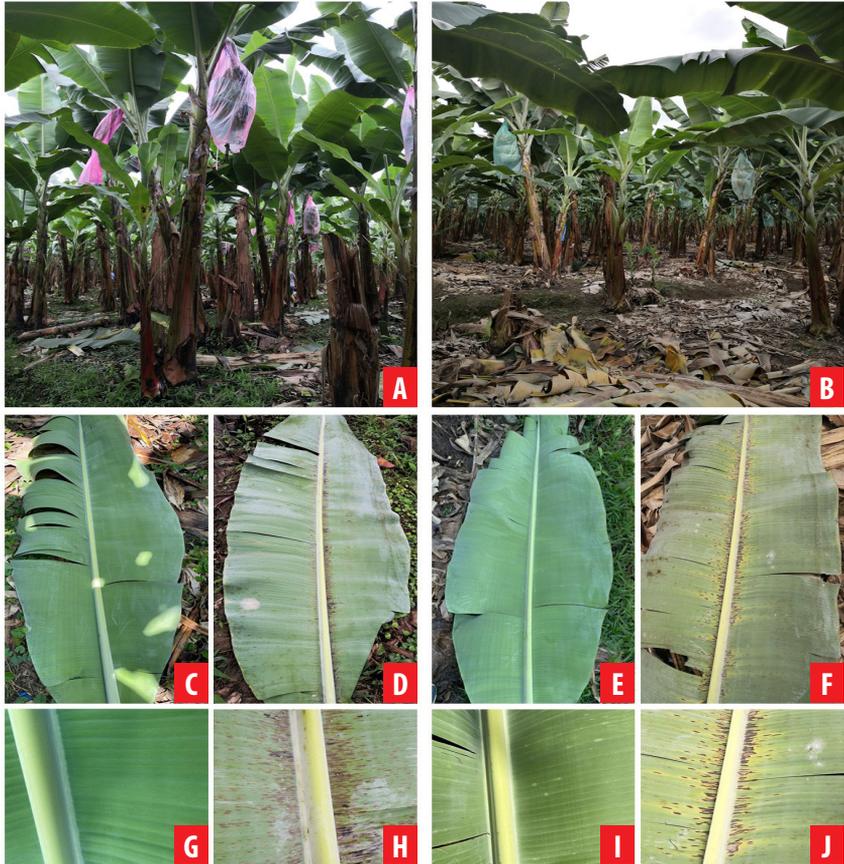


Figura 1. Plantaciones de banano (*Musa x paradisiaca*) en la localidad Santa Rosa, El Oro. (A) Hacienda “San José” con sistema de cultivo orgánico, (C) hoja sana, (D) hoja enferma, (G) acercamiento a la hoja sana y (H) a la hoja enferma. (B) Hacienda “El Cueva” con sistema de cultivo convencional, (E) hoja sana, (F) hoja enferma, (I) acercamiento a la hoja sana y (J) a la hoja enferma.

Desinfección y conservación

Una vez en el laboratorio, las hojas se cortaron en secciones pequeñas con el fin de facilitar su procesamiento. Se desinfectó la superficie foliar, dentro de una cámara de flujo laminar manteniendo condiciones de asepsia, con una solución de hipoclorito de sodio al 10 % y Tween al 0,1 % durante dos minutos. Luego se eliminó los residuos del desinfectante en agua destilada estéril durante dos minutos adicionales. Posteriormente, se dejaron



secar las muestras en papel estéril [24]. Cuando las muestras se secaron se las congeló con nitrógeno líquido previo a liofilizarlas, con el fin de conservar la población de endófitos.

Recuperación de endófitos

Para la realización de la digestión enzimática se tomó 0,5 g de tejido seco pulverizado de cada planta (pool de 5g por tratamiento). A cada pool se añadió 25 mL (relación 5:1 buffer) de buffer de digestión compuesto por Macerozyme al 0,1 %, celulasa al 1 %, D-Manitol 0,7 M, MES 5 mM, cloruro de calcio di-hidratado 9 mM, fosfato diácido monobásico 65 μ M ajustado a un pH de 5,7. Se incubó en un shaker a 28°C, 125 rpm, durante 12 horas [25].

Pasadas las 12 horas de digestión del tejido foliar se realizó dos centrifugaciones seriadas a 200 rpm durante cinco minutos, rescatando el sobrenadante y evitando incluir restos de tejido foliar. La última centrifugación se llevó a cabo a 3000 rpm durante veinte minutos, con el fin de rescatar los microorganismos endófitos presentes en la solución. El pellet se resuspendió en solución salina y se conservó a -20°C en tubos Eppendorf [25].

Extracción de ADN y secuenciamiento de microbioma

La extracción de ADN de hongos y bacterias endófitas recuperadas se realizó con el kit comercial DNeasy Powersoil® (Qiagen, Hilden, Alemania) usando el protocolo estándar establecido en el kit [23]. La concentración y el grado de pureza de las muestras se midieron usando Qubit 4 Fluorometer (Invitrogen, Thermo Fisher Scientific, USA).

Para bacterias se amplificó la región V3–V4 del gen 16S rRNA usando los primers 338F (5'-ACTCCTACGGGAGGCAGCA-3') y 806R (5'-GGACTACHVGGGTWCTAAT-3'). Se añadieron dos barcodes y 6 cambios en marcos de lectura en el extremo 5' del primer 338F, y en el primer 806R basado en el protocolo. Cada reacción de PCR se realizó por triplicado y cada una incluye una mezcla única de 3 primers con cambio de marco para cada plato. El protocolo de PCR se realizó con 5 μ l de Kapa Enhancer, 5 μ l de Kapa Buffer A, 1,25 μ l of, 5 μ M de cada primer y 0,375 μ l de una mezcla de PNAs, 0,5 μ l de Kapa dNTPs, 0,2 μ l Kapa Robust Taq (Kapa Biosystems, Wilmington, MA), 8 μ l dH₂O, 5 μ l DNA. Las condiciones de temperatura fueron: 95°C durante 60 segundos, 24 ciclos de 95°C por 15 segundos, 78°C durante 10 segundos, 50°C por 30 segundos, 72°C por 30 segundos y finalmente, 4°C hasta su uso. Los amplicones se purificaron con beads magnéticos AMPure XP (Beckman Coulter, Brea, CA) y se cuantificaron mediante el uso del fluorómetro Qubit 2.0 (Invitrogen, Carlsbad, CA). El secuenciamiento se llevó a cabo usando 10 pM en el equipo Illumina MiSeq (Illumina, San Diego, CA) como describen Finkel y colaboradores [26].

En cuanto a la región ITS los primers usados son ITS1-F (5'-CTTGGTCATTTAGAGGAAGTAA-3') e ITS2 (5'-GCTGCGTTCTTCATCGATGC-3'). Las muestras de ADN se diluyeron a concentraciones de 3,5 ng μ l⁻¹. Luego se prepararon reacciones por triplicado compuestas por 10 ng de ADN, 1 U de buffer, 0,3 % de suero bovino de albúmina, 2 mM de cloruro de magnesio, 200 μ M de dNTPs, 300 nM de cada primer y 2 U de DFS-Taq DNA polimerasa (Bioron, Ludwigshafen, Alemania). Las condiciones del ciclo son 2 minutos a 94°C, 25 ciclos de 30 segundos a 94°C, 30 segundos a 55°C y 30 segundos a 72°C, finalmente, la terminación del protocolo se realizó a 72°C durante 10 minutos. El producto del PCR a través un proceso de purificación con exonucleasas. Además, se realizó un segundo protocolo de



PCR con el fin de añadir los barcodes específicos para las muestras. Luego, se purificó los amplicones con el kit AMPure XP. Finalmente, se unieron las muestras en proporciones iguales y se diluyó a 10 pM para su posterior secuenciamiento. El secuenciamiento se llevó a cabo en el equipo Illumina MiSeq usando el kit 600-cycle V3 [26].

Procesamiento de datos

Usando MT-Toolbox, se verificó que las secuencias obtenidas tengan el 100 % de la secuencia del *primer* de amplificación y se empalmaron entre sus respectivos pares [27]. Las secuencias resultantes se filtraron por calidad utilizando Sickle al no permitir ninguna ventana con una puntuación Q inferior a 20 [28]. Luego de este filtro, todas las muestras que poseían menos de 1000 *reads* fueron descartadas. Posteriormente, las secuencias resultantes se colapsaron en *amplicon sequence variants* (ASVs) utilizando el paquete R DADA2 versión 1.8.1. Por último, la asignación taxonómica de ASVs se llevó a cabo mediante el método naïve Bayes kmer en DADA2, usando la base de datos Silva 132 [29]. Los ASVs hacen referencia a la recuperación de secuencias exactas presentes en la muestra, basándose en un modelo estadístico de error, por lo tanto, cada ASV corresponde a una única secuencia encontrada en la muestra correspondiente a un único taxón [30].

Por otro lado, las secuencias del ITS fueron procesadas con el paquete DADA, usando los parámetros default en los reads forward. La asignación taxonómica de los ASVs se realizó implementando el método naïve Bayes kmer, usado en el paquete MOTHUR usando la base de datos UNITE [27, 31].

Análisis de datos

Previo al análisis de datos se normalizaron las muestras por medio de rarefacción a 1000 *reads*. Las tablas de conteo resultantes se analizaron con los paquetes de R Ohchibi, ComplexHeatmap y Pheatmap. Los parámetros de α -diversidad y los filogramas se realizaron con el paquete Ohchibi [26]. Por otro lado, el paquete ComplexHeatmap se usó para realizar los UpSet plots que permitieron determinar el core microbiome, que en este caso se define como todos los microorganismos endófitos presentes en la hoja independientemente del estado de salud o sistema de manejo agronómico bajo el que se encuentre la planta; así como otros consorcios de ASVs en común entre muestras [32]. Además, el paquete Pheatmap se usó para realizar heatmaps que permitieron determinar de manera visual que ASVs tenían un mayor número de conteos en comparación a la media en cada muestra, basándose en el Z-score [33]. Finalmente, se realizó un árbol filogenético mediante el algoritmo Maximum Likelihood y modelo Tamura Nei para comparar los ASVs de interés con secuencias de la base de datos RDP para procariontas [4, 34].

RESULTADOS

α -diversidad y composición filogenética microbiana

En este estudio, se colectó y secuenció los datos de 4 pools de las hojas de banano (Fig. 1). Se obtuvo un total de 52 717 conteos de la región 16S (V3-V4) y 575 599 conteos de la región ITS. Una vez realizado el análisis de las secuencias estos se clasifican en 410 ASVs



bacterianos y 234 ASVs fúngicos. Las secuencias resultantes se encuentran depositados en la siguiente base de datos (https://github.com/darioxr/ACI_banano_sigatoka).

En la Figura 2 se presenta la abundancia relativa de la composición filogenética, en la sección (A) el filo bacteriano más abundante en ambas plantaciones es Proteobacteria con 77,67 % y 96,29 % de abundancia relativa en convencional y orgánico respectivamente. Se muestra baja abundancia de Firmicutes en general, siendo mayor en la hoja convencional con 21,08 %. La comunidad microbiana fúngica de la plantación orgánica muestra distribución uniforme, los órdenes Eriotales y Malasseziales son los más abundantes con 23,32 % y 25,23 % respectivamente. Por otro lado, la hoja de la plantación convencional se ve dominada, en su mayoría por los órdenes Cystobasidiales con 53,89 % y Sporidiobolales con 31,14 % respectivamente.

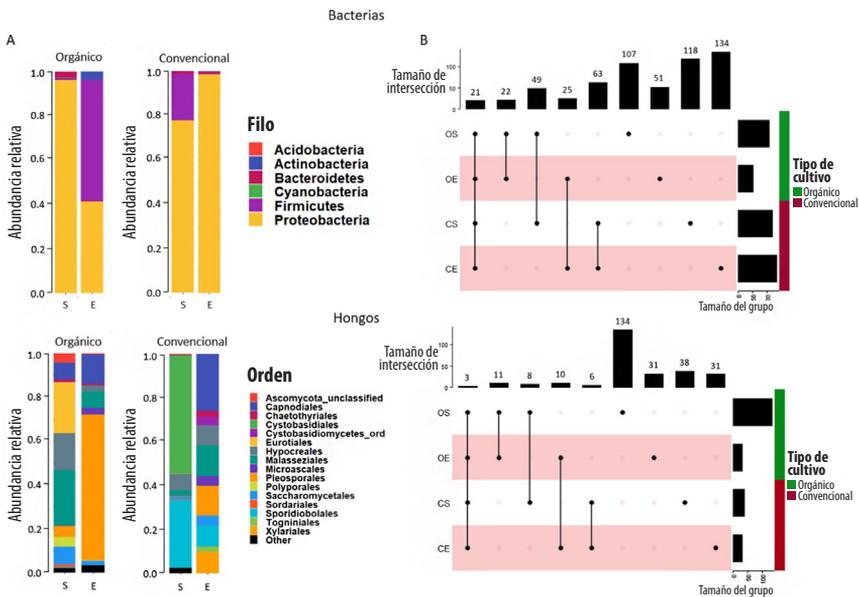


Figura 2. Cambio en (A) composición filogenética y (B) riqueza de ASVs en presencia de *P. fijiensis* para el gen 16S rRNA (V3-V4) y la región ITS: orgánico (O), convencional (C), sano (S) y enfermo (E).

La respuesta de la composición filogenética del microbioma bacteriano es opuesta para cada sistema de manejo, en términos de proporción de los filos Firmicutes y Proteobacteria. La comunidad fúngica del sistema de manejo orgánico se ve dominada por el orden Cystobasidiales en presencia del patógeno, mientras que el convencional se vuelve más uniforme. El microbioma core está compuesto por 21 ASVs bacterianos y 3 ASVs fúngicos. En cuanto a hongos, la hoja orgánica sana posee una riqueza mayor en comparación con las demás muestras.

Todos los parámetros de α -diversidad del microbioma bacteriano en la plantación orgánica disminuyen en presencia del patógeno (Tabla 1). Por otro lado, en la hoja sometida a manejo convencional los parámetros de α -diversidad en bacterias



disminuyen en presencia del patógeno, con excepción del índice de Shannon y la uniformidad (evenness) que se mantienen en un rango similar. La comunidad fúngica, al igual que la bacteriana, disminuye su diversidad en la plantación orgánica, mientras que en la plantación convencional la α -diversidad aumenta en presencia del patógeno, con excepción de Chao1 que se mantiene similar.

Tabla 1. α -diversidad según manejo agronómico en presencia de *P. fijiensis*

Organismo	Manejo agronómico	Estado	Shannon	Chao1	InvSimpson	Evennes
Bacterias	Orgánico	Sano	2,20	160,00	5,62	0,47
		Enfermo	1,50	60,56	2,92	0,38
	Convencional	Sano	1,95	235,44	4,22	0,41
		Enfermo	1,97	179,38	3,63	0,40
Hongos	Orgánico	Sano	3,52	134,00	16,50	0,71
		Enfermo	1,63	31,00	2,22	0,47
	Convencional	Sano	1,54	38,00	2,85	0,42
		Enfermo	3,21	31,00	22,00	0,93

El microbioma bacteriano responde disminuyendo su diversidad en presencia del patógeno, mientras que el fúngico responde diferente dependiendo del sistema de manejo agronómico. En el microbioma de la hoja de banano orgánica disminuye la diversidad, mientras que en el convencional aumenta.

En cuanto a la composición filogenética que se muestra en la Figura 2, la comunidad bacteriana en la sección (A), la hoja orgánica muestra mayor abundancia de la población del filo Firmicutes de 0,83 % a 54,79 % y de Proteobacteria de 96,29 % a 41,38 % en presencia de *P. fijiensis*. Mientras que la hoja convencional muestra el efecto contrario, Proteobacteria domina la población cubriendo un 77,67 % en estado sano y llegando hasta 98,54 % al final de la infección. Por otro lado, en la población fúngica de la plantación orgánica el orden Pleosporales posee la mayor abundancia (66,30 %) en hojas que presentaron infección. Mientras que, en convencional, en estado de infección la población fúngica aunque presenta mayor uniformidad en su comunidad, el orden más abundante es Capnoidiales.

CORE MICROBIOME

Existe una mayor riqueza de ASVs bacterianos en las muestras del manejo agronómico convencional incrementando el número de ASVs de sano a enfermo (Figura 3B). Mientras que el manejo orgánico muestra menor número de ASVs en general y estos disminuyen a alrededor de la mitad en presencia del patógeno. En este estudio se definió al core microbiome al conjunto de ASVs que se comparten independientemente del manejo agronómico y el estado de salud vegetal. La composición del core bacteriano se encuentra dominada por ASVs asignados al género *Pantoea* sp., varios ASVs de la familia Enterobacteriaceae y un ASV asignado a *Pseudomonas* sp. (Figura 3B). Se observa que la composición microbiana se diferencia principalmente dependiendo del estado de salud del huésped, es decir, sano o enfermo. Además, es posible identificar clusters exclusivos para cada tratamiento (Figura 3A). El "Cluster a" que se compone por dos ASVs del género



Pantoea sp. se encuentran incrementados de manera exclusiva en la muestra orgánica enferma, el “Cluster b” compuesto por Enterobacterias y *Pantoea* sp. se incrementa en la muestra convencional enferma, además del “Cluster c.2” compuesto por diferentes ASVs con las mismas asignaciones taxonómicas. Por otro lado, el “Cluster c” es compartido por las muestras del manejo convencional siendo el “Cluster c.1” exclusivo para el estado sano. Además, las muestras orgánicas sanas poseen ASVs incrementados de los géneros *Pantoea* sp. y *Pseudomonas* sp. de manera exclusiva.

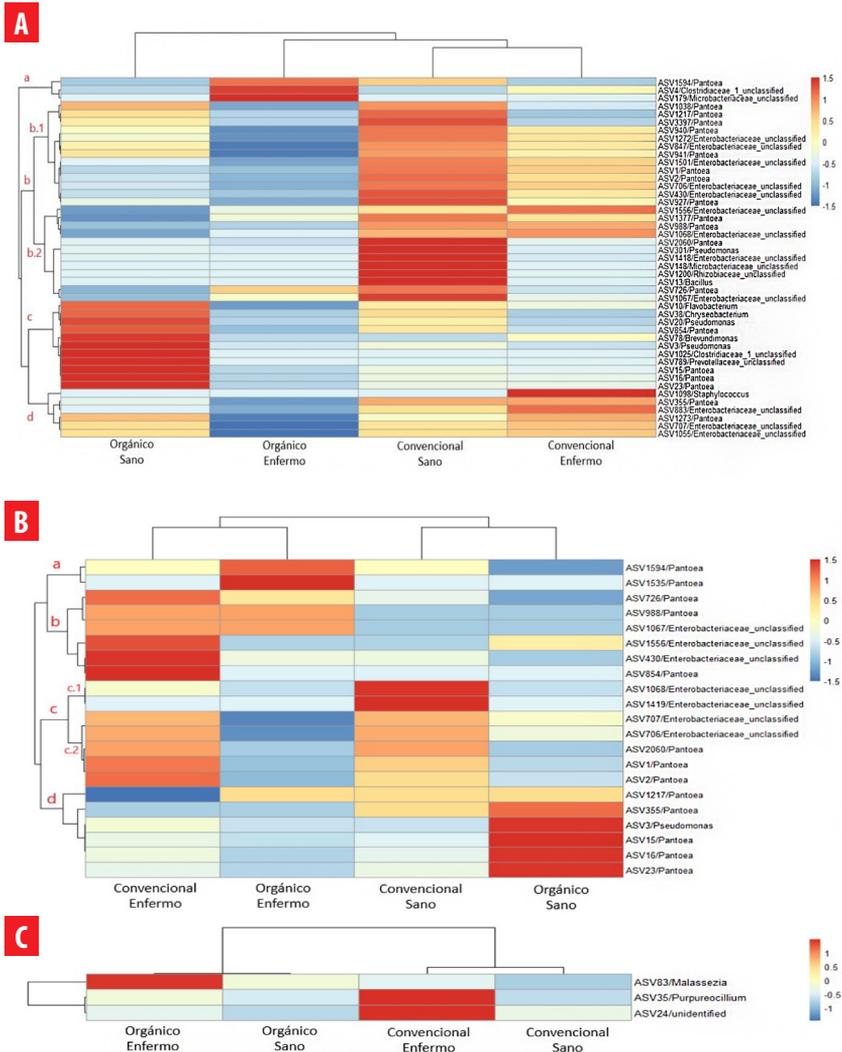


Figura 3. Heatmap plotado con ASVs de (A) muestras bacterianas y el microbioma core (B) bacteriano de 21 ASVs y (C) fúngico de 3 ASVs. El gráfico muestra el enriquecimiento diferencial de ASVs dependiendo del estado de salud y el manejo agronómico.

Los ASVs bacterianos incrementan de manera diferencial dependiendo del sistema de manejo y del estado de salud de la hoja. Los ASVs incrementados en la muestra orgánica sana son de interés para prospección. El core bacteriano se muestra dominado por el género *Pantoea* sp. y géneros de la familia Enterobacteriaceae, mostrando clusters definidos para cada muestra y agrupándose por estado de salud. El core fúngico muestra agrupación por manejo agronómico.

La riqueza fúngica presente en las muestras pertenecientes a la hoja orgánica sana es más de cuatro veces mayor que la presente en las otras muestras (Figura 2B). Además, el core fúngico solo comprende a tres ASVs que pertenecen a los géneros *Malassezia* sp., *Purpureocillium* sp. y ASV no identificado (Figura 3C). Adicionalmente, los ASVs de las muestras sanas no se encuentran incrementados.

IDENTIFICACIÓN DE MICROORGANISMOS DE INTERÉS

La Figura 3 en la sección (A) muestra los ASVs bacterianos presentes en todas las muestras. Se observa que las muestras de la plantación orgánica presentan clusters definidos de escasos ASVs que se encuentran altamente enriquecidos sobre la media. Además, todos los ASVs que se encuentran sobre la media en el estado sano, disminuyen en presencia del patógeno y en este último estado tres ASVs correspondientes al género *Pantoea* sp. y dos géneros no clasificados pertenecientes a las familias Microbacteriaceae y Clostridiaceae incrementan sobre la media. Por otro lado, las hojas del cultivo convencional muestran un espectro más amplio de ASVs aumentados, tanto en sano como en el estado enfermo.

El cluster que posee ASVs enriquecidos en la hoja de la planta sana que se encontraba en la plantación orgánica es exclusivo de esta muestra, es decir, en ninguna de las otras muestras se observa enriquecimiento evidente de estos ASVs. En este contexto, la Figura 4 muestra el árbol filogenético creado para el ASV3 correspondiente al género *Pseudomonas* sp. enriquecido en la muestra sana orgánica, en él se observa que el ASV3 se ubica en el clado exclusivo de *Pseudomonas fluorescens* y se separa del clado de *Pseudomonas syringae*.

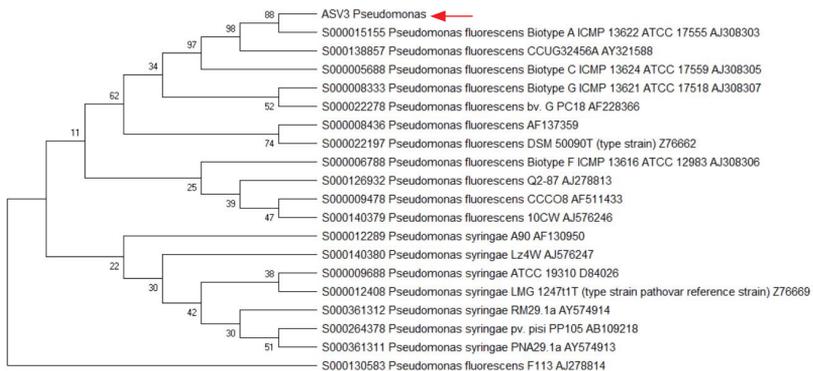


Figura 4. Árbol filogenético realizado con Maximum Likelihood entre el ASV3_ *Pseudomonas*, *P. fluorescens* y *P. syringae*.



El árbol filogenético se realiza con el modelo Namura Tei y el método Maximum Likelihood usando un Bootstrap de 10000. El ASV3 de interés se ubica dentro del caldo de *Pseudomonas fluorescens*.

DISCUSIÓN

Los estudios de microbioma endófito de la filósfera son cada vez más informativos debido a recientes estudios que demuestran causalidad de un ensamblaje microbiano específico sobre efectos disbióticos en el fenotipo foliar de la planta [16]. Sin embargo, estos estudios en planta de banano son escasos y frente a diversos patógenos amenazando la seguridad alimentaria de la fruta más consumida a nivel mundial, existe un creciente interés en generar opciones que contribuyan a la sostenibilidad agronómica.

Los microbiomas en su estado basal entre sistemas de manejo agronómico presentan diferencias estructurales y de diversidad claras. Los resultados de α -diversidad de este estudio no son consistentes con la mayoría investigaciones anteriores. Sin embargo, existe otra evaluación en plantas de uva que demuestra mayor diversidad en una plantación orgánica, que en una convencional [36]. Sin embargo, se realizó un estudio similar en trigo que no demuestra diferencias significativas [36]. En composición filogenética, Proteobacteria corresponde al filo de bacterias más abundante en microbioma vegetal, independientemente de la región, el manejo de cultivo y de la fracción de la planta [1]. El aumento del filo Firmicutes en la plantación convencional se ha observado antes en la filósfera de maíz [37]. Por otro lado, a nivel de género, *Pantoea* corresponde al más común en la filósfera de las plantas [38].

Es necesario tomar en cuenta que los manejos agronómicos orgánicos pueden variar mucho en las prácticas aplicadas en el cultivo de una misma especie y en diferentes especies, por lo tanto, este factor es fundamental en la evaluación del microbioma. Este estudio considera como cultivo orgánico al conjunto de prácticas para el manejo integral de plagas que excluyen el uso de fungicidas de origen sintético. Se pretende comparar entre la microbiota de prácticas orgánicas, descritas anteriormente, y prácticas convencionales que usan fungicidas sintéticos. Una de las limitaciones del estudio se debe a que no se considera la influencia de las diversas prácticas, dentro de los cultivos orgánicos, en los cambios de la microbiota.

Se conoce que al entrar un patógeno las comunidades microbianas que residen en la endósfera de la hoja atraviesan cambios en cuanto a estructura y diversidad. En el caso de las bacterias, disminuye la diversidad y el patrón general de disbiosis es que la abundancia de Firmicutes disminuya y aumente en el filo Proteobacterias lo que ocurre en la plantación convencional, más no en la plantación orgánica [6, 16-18]. La respuesta observada en la plantación orgánica no se ha reportado anteriormente en estudios publicados de evaluaciones de microbioma foliar. Sin embargo, la disminución en la diversidad bacteriana en disbiosis ha sido reportada en varios ejemplos [16, 17, 19].

Aunque los hongos del microbioma vegetal, en general, han sido escasamente explorados, los pocos reportes existentes demuestran que Ascomycetes es el filo más abundante en la filósfera de plantas sanas y enfermas [19, 39-42], y la clase



Dothideomycetes incrementa en presencia de un patógeno [19, 38]. Estudios previos que han estudiado el cambio en la diversidad de la hoja en presencia de un patógeno hemibiótrofo han encontrado una mayor diversidad al final de la infección, lo que también ocurre en la plantación convencional infectada con *P. fijiensis* en nuestro estudio [39, 40]. Sin embargo, en la plantación orgánica una vez necrosado el tejido la diversidad disminuye, lo que no se ha reportado anteriormente en la literatura.

Esto sugiere que realmente existen patrones de respuesta en la diversidad y composición filogenética que se ajustan más a lo que ocurre en la hoja de banano de una plantación convencional. Lo observado en las comunidades fúngicas de plantación orgánica no se ha reportado anteriormente, por lo tanto, es un punto de investigación interesante para prospección sobre microorganismos que probablemente están interviniendo de manera activa en el control sobre el desarrollo del patógeno.

Entre los microorganismos que se encuentran aumentados en la muestra de la planta orgánica sana se encuentra el género *Pseudomonas* sp. Este género comprende cientos de especies que poseen características como potenciadores de crecimiento y controladores biológicos mediante diversos mecanismos [43]. Sin embargo, dentro de este género también se encuentra una especie fitopatogena que en las últimas décadas se ha convertido en un modelo de estudio que ha llevado a la ciencia vegetal a comprender diversos patrones de patogénesis [44]. Existen varias cepas de la especie *Pseudomonas fluorescens* que han sido evaluadas como prometedoras en plantas de banano para el control de *Fusarium oxysporum* [45]. Desde entonces, se han realizado varias evaluaciones de esta especie como antagonistas a diversos fitopatógenos como *F. oxysporum* f. sp. ciceris (agente causal de la enfermedad Fusarium wilt), *Rhizoctonia solani* (agente causal de blight del arroz), *Pyricularia oryzae* (agente causal de blast del arroz), entre otras [46].

Pseudomonas fluorescens Pf1 es una cepa bacteriana que produce sideoforos, cianido de hidrógeno, antibióticos y pioluteorina, además induce la resistencia asociada a enzimas en raíces de plantas de banano para combatir Foc [47]. En base a estos reportes se han realizado diversos ensayos demostrando la efectividad de varios formulados y protocolos de aplicación de *P. fluorescens* Pf1 contra el patógeno de suelo *F. oxysporum*. Además, se conoce que la aplicación de formulados de esta cepa provee mayor protección a estrés ambiental a plantas de banano [46]. *P. fluorescens* Pf1 es un ejemplo de microorganismos que atraviesan procesos evolutivos de especialización con la planta huésped de banano para conferirle características que le provean beneficios para combatir la colonización del tejido vegetal por fitopatógenos. Hemos mencionado que el potencial de interacción planta microbioma en la región inferior, es decir, bajo la superficie de la tierra, ha sido ampliamente explorado [1]. Por esto, explorar y explotar el potencial del microbioma foliar que se encuentran en la región de infección en la planta interactuando directamente con el patógeno es un área muy interesante por explorar.

En este estudio, Proteobacterias se muestra como el filo más abundante en ambas plantaciones, con un ligero incremento del filo Firmicutes en la hoja perteneciente a convencional. En cuanto a hongos el filo más abundante es Ascomycota. De manera detallada, el microbioma bacteriano disminuye en términos de diversidad cuando *P. fijiensis* necrosa la hoja independientemente del sistema de cultivo. Por otro lado, la



respuesta del microbioma fúngico frente al patógeno varía dependiendo del sistema de manejo agronómico. En el caso de la plantación convencional la diversidad aumenta al final de la infección, mientras que en el manejo orgánico la diversidad disminuye. El core microbiome se encuentra compuesto por 21 ASVs bacterianos y 3 fúngicos, dominados por el género *Pantoea*, la familia Enterobacteriaceae y los géneros fúngicos *Malassezia* sp. y *Purpureocillium* sp. Además, se encuentra un ASV asociado a la especie de controladores biológicos *P. fluorescens*, sugiriendo que la endósfera de plantas que no han estado expuestas a biocidas durante largos periodos de tiempo, posee gran potencial de ser reservorio de microorganismos con propiedades beneficiosas para el desarrollo vegetal y control biológico.

AGRADECIMIENTOS

Al laboratorio de Biotecnología Agrícola y de Alimentos de la Universidad San Francisco de Quito USFQ por el apoyo y financiamiento para realizar la investigación. Al Departamento de Biología de la Universidad de North Carolina, Chapel Hill por el apoyo en el secuenciamiento de las muestras. A los propietarios de las plantaciones en El Oro por permitirnos realizar el muestreo y recolectar información y a Esteban Espinosa por el apoyo en la toma de muestras.

Esta investigación se ejecutó en el Contrato Marco de Acceso a Recursos Genéticos Código: MAE-DNB-CM-2018-0085, bajo la siguiente denominación: "ESTUDIO DE DIVERSIDAD DE MICROORGANISMOS DE IMPORTANCIA MÉDICA, VETERINARIA, INDUSTRIAL, AMBIENTAL Y AGROPECUARIA DEL ECUADOR".

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Alejandra Paladines: realizó la investigación, el muestreo, el trabajo de laboratorio, el análisis bioinformático, la redacción del manuscrito.

Darío Ramírez: supervisión en el desarrollo de la investigación, muestreo, trabajo de laboratorio, análisis bioinformático, redacción del manuscrito.

Claudia Zapata: apoyo en la investigación, en el procesamiento de las muestras y muestreo.

Antonio León: supervisión general del proyecto y revisión del manuscrito.

CONFLICTO DE INTERESES

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

REFERENCIAS

- [1] Trivedi, P., Leach, J. E., Tringe, S. G., Sa, T. y Singh, B. K. (2020). Plant–microbiome interactions: from community assembly to plant health. *Nature Reviews Microbiology*, 18(11), 607–621. doi: <https://doi.org/10.1038/s41579-020-0412-1>
- [2] Liu, H., Brettell, L. E. y Singh, B. (2020). Linking the Phyllosphere Microbiome to Plant Health. *Trends in Plant Science*, 25(9), 841–844. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2020.06.003>
- [3] Vorholt, J. A. (2012). Microbial life in the phyllosphere. *Nature Reviews Microbiology*, 10(12), 828–840. doi: <https://doi.org/10.1038/nrmicro2910>
- [4] Marchesi, J. R. y Ravel, J. (2015). The vocabulary of microbiome research: a proposal. *Microbiome*, 3(3). doi: <https://doi.org/10.1186/s40168-015-0094-5>
- [5] Kim, M., Singh, D., Lai-Hoe, A., Go, R., Rahim, R. A., Ainuddin, A. N., Chun, J. y Adams, J. M. (2012). Distinctive Phyllosphere Bacterial Communities in Tropical Trees. *Microbial Ecology*, 63(3), 674–681. doi: <https://doi.org/10.1007/s00248-011-9953-1>
- [6] Humphrey, P. T. y Whiteman, N. K. (2020). Insect herbivory reshapes a native leaf microbiome. *Nature Ecology and Evolution*, 4(2), 221–229. doi: <https://doi.org/10.1038/s41559-019-1085-x>
- [7] Liu, H., Carvalhais, L. C., Crawford, M., Singh, E., Dennis, P. G., Pieterse, C. M. J. y Schenk, P. M. (2017). Inner plant values: Diversity, colonization and benefits from endophytic bacteria. *Frontiers in Microbiology*, 8(DEC), 1–17. doi: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.02552>
- [8] Bodenhausen, N., Somerville, V., Desirò, A., Walser, J. C., Borghi, L., Van Der Heijden, M. G. A. y Schlaeppi, K. (2019). Petunia- And Arabidopsis-specific root microbiota responses to phosphate supplementation. *Phytobiomes Journal*, 3(2), 112–124. doi: <https://doi.org/10.1094/PBIOMES-12-18-0057-R>
- [9] Castrillo, G., Teixeira, P. J. P. L., Paredes, S. H., Law, T. F., De Lorenzo, L., Feltcher, M. E., Finkel, O. M., Breakfield, N. W., Mieczkowski, P., Jones, C. D., Paz-Ares, J. y Dangl, J. L. (2017). Root microbiota drive direct integration of phosphate stress and immunity. *Nature*, 543(7646), 513–518. doi: <https://doi.org/10.1038/nature21417>
- [10] Lu, T., Ke, M., Lavoie, M., Jin, Y., Fan, X., Zhang, Z., Fu, Z., Sun, L., Gillings, M., Peñuelas, J., Qian, H. y Zhu, Y. G. (2018). Rhizosphere microorganisms can influence the timing of plant flowering. *Microbiome*, 6(1), 1–12. doi: <https://doi.org/10.1186/s40168-018-0615-0>
- [11] Cha, J. Y., Han, S., Hong, H. J., Cho, H., Kim, D., Kwon, Y., Kwon, S. K., Crusemann, M., Bok Lee, Y., Kim, J. F., Giaever, G., Nislow, C., Moore, B. S., Thomashow, L. S., Weller, D. M. y Kwak, Y. S. (2016). Microbial and biochemical basis of a Fusarium wilt-suppressive soil. *ISME Journal*, 10(1), 119–129. doi: <https://doi.org/10.1038/ismej.2015.95>
- [12] Rastogi, G., Coaker, G. L. y Leveau, J. H. J. (2013). New insights into the structure and function of phyllosphere microbiota through high-throughput molecular approaches. *FEMS Microbiology Letters*, 348(1), 1–10. doi: <https://doi.org/10.1111/1574-6968.12225>
- [13] Fitzpatrick, C. R., Mustafa, Z. y Viliunas, J. (2019). Soil microbes alter plant fitness under competition and drought. *Journal of Evolutionary Biology*, 32(5), 438–450. doi: <https://doi.org/10.1111/jeb.13426>
- [14] Eida, A. A., Ziegler, M., Lafi, F. F., Michell, C. T., Voolstra, C. R., Hirt, H. y Saad, M. M. (2018). Desert plant bacteria reveal host influence and beneficial plant growth properties. *PLoS ONE*, 13(12), 1–20. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0208223>
- [15] Lei, L. (2020). Phyllosphere dysbiosis. *Nature Plants*, 6(5), 434. doi: <https://doi.org/10.1038/s41477-020-0674-7>
- [16] Chen, T., Nomura, K., Wang, X., Sohrabi, R., Xu, J., Yao, L., Paasch, B. C., Ma, L., Kremer, J., Cheng, Y., Zhang, L., Wang, N., Wang, E., Xin, X. F. y He, S. Y. (2020). A plant genetic network for preventing dysbiosis in the phyllosphere. *Nature*, 580(7805), 653–657. doi: <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2185-0>
- [17] Purahong, W., Orrù, L., Donati, I., Perpetuini, G., Cellini, A., Lamontanara, A., Michelotti, V., Tacconi, G. y Spinelli, F. (2018). Plant microbiome and its link to plant health: Host species, organs and pseudomonas syringae pv. Actinidiae infection shaping bacterial phyllosphere communities of kiwifruit plants. *Frontiers in Plant Science*, 871(November), 1–16. doi: <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01563>

Estudio preliminar de la microbiota foliar de banano y su variación en presencia del patógeno Sigatoka Negra (*Pseudocercospora fijiensis*)
Paladines-Montero / Zapata / Ramírez-Villacis / León-Reyes (2022)

- [18] Smets, W. y Koskella, B. (2020). Microbiome: Insect Herbivory Drives Plant Phyllosphere Dysbiosis. *Current Biology*, 30(9), R412–R414. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2020.03.039>
- [19] Li, P., Xu, J., Wang, Z. y Li, H. (2020). *Phyllosphere Microbiome in Response to Citrus Melanose*. 1–26. doi: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-51076/v1>
- [20] Evans, E. y Ballen, F. (2018). Banana Market. *University of Florida. IFAS Extension*, 1–9. <http://edis.ifas.ufl.edu/pdffiles/FE/FE90100.pdf>
- [21] Churchill, A. C. L. (2011). *Mycosphaerella fijiensis*, the black leaf streak pathogen of banana: progress towards understanding pathogen biology and detection, disease development, and the challenges of control. *Molecular Plant Pathology*, 12(4), 307–328. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2010.00672.x>
- [22] Manzo-Sánchez, G., Orozco-Santos, M., Islas-Flores, I., Martínez-Bolaños, L., Guzmán-González, S., Leopardi-Verde, C. L. y Canto-Canché, B. (2019). Genetic variability of *Pseudocercospora fijiensis*, the black Sigatoka pathogen of banana (*Musa* spp.) in Mexico. *Plant Pathology*, 68(3), 513–522. doi: <https://doi.org/10.1111/ppa.12965>
- [23] Kimunye, J. N., Muzhinji, N., Mostert, D., Viljoen, A., van der Merwe, A. E. y Mahuku, G. (2020). Genetic Diversity and Mating Type Distribution of *Pseudocercospora fijiensis* on Banana in Uganda and Tanzania. *Phytopathology*®. doi: <https://doi.org/10.1094/PHYTO-04-20-0138-R>
- [24] Lu-Irving, P., Harenár, J. G., Sounart, H., Welles, S. R., Swope, S. M., Baltrus, D. A. y Dlugosch, K. M. (2019). Native and Invading Yellow Starthistle (*Centaurea solstitialis*) Microbiomes Differ in Composition and Diversity of Bacteria. *MSphere*, 4(2). doi: <https://doi.org/10.1128/mSphere.00088-19>
- [25] Jiao, J.-Y., Wang, H.-X., Zeng, Y. y Shen, Y.-M. (2006). Enrichment for microbes living in association with plant tissues. *Journal of Applied Microbiology*, 100(4), 830–837. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2006.02830.x>
- [26] Finkel, O. M., Salas-González, I., Castrillo, G., Spaepen, S., Law, T. F., Teixeira, P. J. P. L., Jones, C. D., y Dangl, J. L. (2019). The effects of soil phosphorus content on plant microbiota are driven by the plant phosphate starvation response. *PLoS Biology*, 17(11), 1–34. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3000534>
- [27] Yourstone, S.M., Lundberg, D.S., Dangl, J.L. y Jones, C.D. (2014). MT-Toolbox: improved amplicon sequencing using molecule tags. *BMC Bioinformatics*, 15. doi: <https://doi.org/10.1186/1471-2105-15-284>
- [28] Joshi, N. y Sickle, F. (2011). *No Title*. A Sliding-Window, Adaptive, Quality-Based Trimming Tool for FastQ Files (Version 1.33). <https://github.com/najoshi/sickle>
- [29] Callahan, B. J., McMurdie, P. J., Rosen, M. J., Han, A. W., Johnson, A. J. A. y Holmes, S. P. (2016). DADA2: High-resolution sample inference from Illumina amplicon data. *Nature Methods*, 13(7), 581–583. doi: <https://doi.org/10.1038/nmeth.3869>
- [30] Prodan, A., Tremoli, V., Brolin, H., Zwinderman, A., Nieuwdrop, M. y Levin, E. (2020). Comparing bioinformatic pipelines for microbial 16S rRNA amplicon sequencing. *PLoS ONE* 15(1): e0227434. doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0227434>
- [31] Schloss, P. D., Westcott, S. L., Ryabin, T., Hall, J. R., Hartmann, M., Hollister, E. B., Lesniewski, R. A., Oakley, B. B., Parks, D. H., Robinson, C. J., Sahl, J. W., Stres, B., Thallinger, G. G., Van Horn, D. J. y Weber, C. F. (2009). Introducing mothur: open-source, platform-independent, community-supported software for describing and comparing microbial communities. *Applied and Environmental Microbiology*, 75(23), 7537–7541. doi: <https://doi.org/10.1128/AEM.01541-09>
- [32] Gu, Z. (2020). *ComplexHeatmap Complete Reference*. ComplexHeatmap Complete Reference. <https://jokergoo.github.io/ComplexHeatmap-reference/book/>
- [33] Kolde, R. (2019). *pheatmap: Pretty Heatmaps*. Pheatmap: Pretty Heatmaps. <https://cran.r-project.org/web/packages/pheatmap/index.html>
- [34] Adhikari, A., Nandi, S., Bhattacharya, I., Roy, M. De, Mandal, T. y Dutta, S. (2015). Phylogenetic analysis based evolutionary study of 16S rRNA in known *Pseudomonas* sp. *Bioinformation*, 11(10), 474–480. doi: <https://doi.org/10.6026/97320630011474>
- [35] Perazzolli, M., Antonielli, L., Storari, M., Puopolo, G., Pancher, M., Giovannini, O., Pindo, M. y Pertot, I. (2014). Resilience of the natural phyllosphere microbiota of the grapevine to chemical and biological pesticides. *Applied and Environmental Microbiology*, 80(12), 3585–3596. doi: <https://doi.org/10.1128/AEM.00415-14>

- [36] Gdanetz, K. y Trail, F. (2017). The wheat microbiome under four management strategies, and potential for endophytes in disease protection. *Phytobiomes Journal*, 1(3), 158–168. doi: <https://doi.org/10.1094/PBIOMES-05-17-0023-R>
- [37] Wagner, M. R., Busby, P. E. y Balint-Kurti, P. (2020). Analysis of leaf microbiome composition of near-isogenic maize lines differing in broad-spectrum disease resistance. *New Phytologist*, 225(5), 2152–2165. doi: <https://doi.org/10.1111/nph.16284>
- [38] Griffiths, S. M., Galambao, M., Rowntree, J., Goodhead, I., Hall, J., O'Brien, D., Atkinson, N. y Antwis, R. E. (2020). Complex associations between cross-kingdom microbial endophytes and host genotype in ash dieback disease dynamics. *Journal of Ecology*, 108(1), 291–309. doi: <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13302>
- [39] Luo, L., Zhang, Z., Wang, P., Han, Y., Jin, D., Su, P., Tan, X., Zhang, D., Muhammad-Rizwan, H., Lu, X. y Liu, Y. (2019). Variations in phyllosphere microbial community along with the development of angular leaf-spot of cucumber. *AMB Express*, 9(1). doi: <https://doi.org/10.1186/s13568-019-0800-y>
- [40] Zhang, Z., Kong, X., Jin, D., Yu, H., Zhu, X., Su, X., Wang, P., Zhang, R., Jia, M. y Deng, Y. (2019). *Euonymus japonicus* phyllosphere microbiome is significantly changed by powdery mildew. *Archives of Microbiology*, 201(8), 1099–1109. <https://doi.org/10.1007/s00203-019-01683-3>
- [41] Zhang, Z., Luo, L., Tan, X., Kong, X., Yang, J., Wang, D., Zhang, D., Jin, D., y Liu, Y. (2018). Pumpkin powdery mildew disease severity influences the fungal diversity of the phyllosphere. *PeerJ*, 2018(4), 1–16. doi: <https://doi.org/10.7717/peerj.4559>
- [42] Hesse, C., Schulz, F., Bull, C. T., Shaffer, B. T., Yan, Q., Shapiro, N., Hassan, K. A., Varghese, N., Elbourne, L. D. H., Paulsen, I. T., Kyrpides, N., Woyke, T. y Loper, J. E. (2018). Genome-based evolutionary history of *Pseudomonas* spp. *Environmental Microbiology*, 20(6), 2142–2159. doi: <https://doi.org/10.1111/1462-2920.14130>
- [43] Katagiri, F., Thilmony, R. y He, S. Y. (2002). The *Arabidopsis thaliana*-*Pseudomonas syringae* interaction. *The Arabidopsis Book*, 1, e0039. doi: <https://doi.org/10.1199/tab.0039>
- [44] Selvaraj, S., Ganeshamoorthi, P., Anand, T., Raguchander, T., Seenivasan, N., & Samiyappan, R. (2014). Evaluation of a liquid formulation of *Pseudomonas fluorescens* against *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* and *Helicotylenchus multicinctus* in banana plantation. *BioControl*, 59, 345–355. doi: <https://doi.org/10.1007/s10526-014-9569-8>
- [45] Bubici, G., Kaushal, M., Prigigallo, M. I., Gómez-Lama Cabanás, C. y Mercado-Blanco, J. (2019). Biological Control Agents Against *Fusarium Wilt* of Banana. *Frontiers in Microbiology*, 10, 616. doi: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00616>
- [46] Akila, R., Rajendran, L., Harish, S., Saveetha, K., Raguchander, T. y Samiyappan, R. (2011). Combined application of botanical formulations and biocontrol agents for the management of *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* (Foc) causing *Fusarium wilt* in banana. *Biological Control*, 57(3), 175–183. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2011.02.010>

Labor displacement effects over inter-temporal earnings mobility

Nicolle Jaramillo

Universidad San Francisco de Quito

* Corresponding author/ Autor principal: nikyj1399@hotmail.com

Efectos intertemporales del desplazamiento laboral sobre la movilidad de ingresos

Abstract

I study how involuntary job loss affects workers' inter-temporal labor earnings mobility. I use Panel Study Income Dynamics (PSID) 1973-2017 survey waves to construct transition probability matrices and compute ordered logistic regression estimates. I find that being displaced increases downward mobility compared to never displaced workers. The reduction of hours worked, large spells of unemployment and the destruction of firm-specific human capital depreciate the market value of a displaced worker generating significant labor income losses.

Keywords: PSID, displacement, involuntary job loss, inter-generational mobility, income mobility, labor economics.

Resumen

En este trabajo, yo estudio cómo una separación laboral involuntaria afecta a la movilidad intertemporal en la distribución de ingresos laborales de los trabajadores. Con ese fin, uso datos de *Panel Study Income Dynamics* (PSID) de los años 1973-2017 para construir matrices de probabilidad de transiciones y para obtener estimadores a través de una regresión logística ordenada.

Encontré que estar desplazado laboralmente aumenta la probabilidad de que el trabajador esté en deciles de ingreso inferiores en contraste a los resultados de un trabajador que nunca ha experimentado desplazamiento. La reducción de horas trabajadas, largos períodos de desempleo y la destrucción de capital humano específico deprecian el valor de mercado de un trabajador desplazado, así se generan pérdidas de ingreso significativas.

Palabras clave: PSID, desplazamiento laboral, movilidad intergeneracional, movilidad de ingresos, economía laboral.



Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /
Edited by:
Melissa Infusino

Recibido /
Received:
15/05/2021

Aceptado /
Accepted:
26/01/2022

Publicado en línea /
Published online:
16/05/2022



INTRODUCTION

From 1973 to 2017, nearly 14% of workers have experienced displacement in the United States. After two years of involuntary job loss, displaced workers perceive, on average, \$14,622 real¹ labor earnings while never displaced individuals earn \$27,388. This significant gap shows the importance of being aware of how displacement influences movements throughout the labor income distribution and its implications for policies designed to mitigate the adverse effects of unemployment. With this in mind, how do displacement affect long-term income mobility?

To answer this question, I use the 1973-2017 survey waves of the Panel Study Income Dynamics (PSID) to analyze how involuntary job loss affects workers' inter-temporal labor earnings mobility across time. To study the impact of displacement, I construct transition probabilities to compare mobility patterns among displacement status. Furthermore, I use an ordered logistic regression to estimate the long-term income loss of displaced individuals. Then, I use these estimates to calculate the probability of a displaced worker being in any decile of the income distribution relative to never displaced workers. The increased probability of moving downward after displacement occurs because displacement alters the labor income by decreasing hours worked, causing spells of unemployment, and possibly destroying the human capital formation.

I contribute to the existing literature on labor displacement in two ways. First, by extending the time horizon for the analysis, I show that displacement adverse effects are more severe two years after displacement increasing the probability of being at the bottom half of the labor income distribution by 135% in contrast to the probability in the year of displacement. Second, by using transition matrices and ordered logistic regression, I can compare mobility over displaced and never displaced workers considering the effects of specific demographic traits. The pre-displacement income gap is significant in the transition matrices where I do not control for individual characteristics. Also, the post-displacement gap tends to close faster when I control for specific workers' attributes.

Literature on the effects of involuntary job losses begins with magnitude estimations of income losses [1, 2, 3]. It has also been done using large data sets like the PSID [4, 5, 6, 7, 8]. Also, a compact summary of the main results across several data sets can be found [9].

Another approach taken in the literature is the study of trends upon job losses [10] and the persistence of its adverse effects [5]. Some have explained these losses using a displacement typology [11] and demographic traits [12]. Also, some explanations for the variations on the empirical results are labor market conditions [13], losses in firm wage premiums [14], idiosyncratic ability [15], and transferability of human capital across occupations [16].

Nevertheless, there is little literature that focus on mobility and displacement. A study finds an increase of the proportion of workers with earnings below than \$10,000 due to displacement [7], while other use probit models to explore how voluntary and involuntary job losses affect mobility. On the other hand [8], another finds that the

¹ Real earnings are calculated using 1982-1984 as base years.



probability of entering poverty increases due to displacement [17]. This goes in line with Jolly, where he finds that the probability of being at the bottom half of the earnings distribution increases significantly, not only in the year of displacement, but also several years after. Furthermore, he considers additional measures of financial well-being that reduce the short and long-term impact of displacement [6].

This paper is organized as follows. Section two presents the methodology. In Section three, I describe the data. Then, Section four provides the results, and Section five concludes and provides a brief discussion on further steps to study the long-term effects of job displacement.

METHODOLOGY

My primary goal is to study the effects of job displacement on an individual's movement over the ranking in labor income distributions. For this reason, this analysis uses two methodologies: transition matrices and ordered logistic regression. Each approach observes how displacement affects income mobility over time. The first provides a brief overview of the probability of workers' movements across the distribution and gives information about the persistence of income shocks. The second approach permits the identification of factors that influence the workers' movement throughout income deciles.

Transition matrices

Transition matrices estimate the probability of specific movements across the distribution over time. They also provide information about the persistence of income shocks, allowing to observe if the negative shock of being displaced is persistent or not. On the one hand, if the shock is persistent, the probability of moving between deciles will increase. On the other hand, if the shock is transitory, the probability of changing income deciles will be the same in the short and long run. The first step to build transition matrices is to generate labor income deciles over the sample's distribution. This procedure maintains the upper and lower distribution bounds fixed over the estimations. Later on, it is necessary to split the sample among displaced and never displaced individuals to identify their differences.

This section uses the same notation and methodology as Jolly [6]. It starts with the formulation of binary variables that capture movements across deciles for every individual of each data subset. I follow each transition by the indicator $\rho_{i,d,l}^{t,t+r}$ which is equal to one if the individual i moves from decile d to decile l between periods t and $t+r$. Then, I create new variables and calculate their mean according to the movements' direction and magnitude. For example, the variable upward 8 refers to the sum's average of individuals' movements from decile one to decile nine and decile two to decile ten.

The reference point t differs from each data subset. On the one hand, the displaced workers' reference period is four years before the job loss, ensuring previous labor market attachment. On the other hand, the reference point for the never displaced comes from a random number among periods that follow a uniform distribution.



Ordered Logistic Regression

An ordered logistic regression gives more accurate results than transition matrices. Including control variables allows a more profound understanding of how different demographic factors influence displacement adverse effects. Its construction begins by estimating an earnings equation using a fixed-effects estimator to observe the process of wage determination. This data then allows the computation of income deciles given the parameter estimates distribution. Furthermore, I use an ordered logistic regression where the estimated deciles are the dependent variable. Each outcome's marginal effects represent the probability of being at any decile in a specific period.

The earnings equation (1) is similar to the one used by Couch [9]:

$$y_{it}^* = x_{it}'\theta + \sum_{k \geq -4} D_{is}^k \partial_k + \gamma_t + \varepsilon_{it} + v_i, \quad (1)$$

where x_{it} includes demographic characteristics of the sample and quadratic potential experience, and θ captures the effect of these traits. In addition, D_{is}^k a dummy variable equal to one if the individual experiments displacement in year s and k indexes these variables four years before the job loss. Also, γ_t are the period dummy variables and ε_{it} is the time-variant error. Finally, it is assumed that v_i is the time-invariant and unobserved individual effect, and it has independence of the observed predictor variables. The latter are independently and randomly distributed as normal with mean zero and known variances, σ_v^2 and σ_ε^2 respectively.

The individual i falls in one of the following categories, where α_j are the lower and upper bounds of each decile:

$$y_{it} = \begin{cases} 1 & \text{if } y_{it}^* \leq \alpha_1, \\ 2, \dots, 9 & \text{if } \alpha_{j-1} < y_{it}^* \leq \alpha_j \\ 10 & \text{if } y_{it}^* \geq \alpha_9, \end{cases} \quad \forall_j = 2, \dots, 9, \quad (2)$$

To obtain the probability that y_{it} takes in each decile, I use an ordered logistic regression. To simplify notation, I assume:

$$z_{it}\beta = x_{it}\theta + \sum_{k \geq -4} D_{is}^k \partial_k + \gamma_t, \quad (3)$$

Then I plug (3) in (2):

$$y_{it} = \begin{cases} 1 & \text{if } z_{it}\beta + \varepsilon_{it} + v_i \leq \alpha_1, \\ 2, \dots, 9 & \text{if } \alpha_{j-1} < z_{it}\beta + \varepsilon_{it} + v_i \leq \alpha_j \\ 10 & \text{if } z_{it}\beta + \varepsilon_{it} + v_i \geq \alpha_9, \end{cases} \quad \forall_j = 2, \dots, 9, \quad (4)$$

and, after rearranging, I obtain:

$$y_{it} = \begin{cases} 1 & \text{if } \varepsilon_{it} \leq \alpha_1 - (z_{it}\beta + v_i), \\ 2, \dots, 9 & \text{if } \alpha_{j-1} < \varepsilon_{it} \leq \alpha_j - (z_{it}\beta + v_i) \\ 10 & \text{if } \varepsilon_{it} \geq \alpha_9 - (z_{it}\beta + v_i), \end{cases} \quad \forall_j = 2, \dots, 9, \quad (5)$$



The probability of each case is easy to obtain due to the normal distribution assumption on ε_{it} and v_i . It goes as follows:

$$\begin{aligned}
 P(y_{it} = 1 | z_{it}, v_i) &= P(y_{it}^* \leq \alpha_1 | z_{it}, v_i) \\
 &= \Lambda \left[\frac{\alpha_1 - (z_{it}\beta + v_i)}{\sigma_\varepsilon} \right], \\
 P(y_{it} = 2 | z_{it}, v_i) &= P(\alpha_1 < y_{it}^* \leq \alpha_2 | z_{it}, v_i) \\
 &= \Lambda \left[\frac{\alpha_2 - (z_{it}\beta + v_i)}{\sigma_\varepsilon} \right] - \Lambda \left[\frac{\alpha_1 - (z_{it}\beta + v_i)}{\sigma_\varepsilon} \right], \\
 &\vdots \\
 &\vdots \\
 P(y_{it} = 9 | z_{it}, v_i) &= P(\alpha_8 < y_{it}^* \leq \alpha_9 | z_{it}, v_i) \\
 &= \Lambda \left[\frac{\alpha_9 - (z_{it}\beta + v_i)}{\sigma_\varepsilon} \right] - \Lambda \left[\frac{\alpha_8 - (z_{it}\beta + v_i)}{\sigma_\varepsilon} \right], \\
 P(y_{it} = 10 | z_{it}, v_i) &= P(y_{it}^* > \alpha_9 | z_{it}, v_i) \\
 &= 1 - \Lambda \left[\frac{\alpha_9 - (z_{it}\beta + v_i)}{\sigma_\varepsilon} \right],
 \end{aligned} \tag{6}$$

where the parameters α and β are estimated through the log-likelihood function:

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L}_{it}(\alpha, \beta) &= 1[y_{it} = 1] \log[\Lambda(\alpha_1 - z_{it}\beta)] \\
 &\quad + 1[y_{it} = 2] \log[\Lambda(\alpha_2 - z_{it}\beta) - \Lambda(\alpha_1 - z_{it}\beta)] \\
 &\quad + \dots + 1[y_{it} = 10] \log[1 - \Lambda(\alpha_9 - z_{it}\beta)].
 \end{aligned} \tag{7}$$

Since β 's magnitude is not my primary interest, I focus on the outcomes' marginal effects. These can be obtained by taking the derivative of (6) with respect to x_{it} :

$$\begin{aligned}
 \frac{\delta p_1(x')}{\delta x_{it}} &= -\beta_{it} \Lambda(\alpha_1 - z_{it}\beta), \\
 \frac{\delta p_2(x')}{\delta x_{it}} &= -\beta_{it} [\Lambda(\alpha_2 - z_{it}\beta) - \Lambda(\alpha_1 - z_{it}\beta)], \\
 &\vdots \\
 &\vdots \\
 \frac{\delta p_{10}(x')}{\delta x_{it}} &= -\beta_{it} \Lambda(\alpha_9 - z_{it}\beta).
 \end{aligned} \tag{8}$$

DATA

I use the Panel Study of Income Dynamics (PSID) of the US. It is currently the most comprehensive longitudinal household survey, starting in 1986 until nowadays. Consequently, it was annually conducted from 1968 to 1997 and biennially thereafter. By these methods, the PSID collects information for 18000 individuals of 5000 families. It covers topics like employment, income, wealth, and expenditures, among others.



I draw on biennial data from 1973 to 2017 to follow individuals over the same time intervals. The subjects of analysis are male heads of households between 25 and 61 years old who reported non-zero labor earnings. I follow these selection criteria to avoid potential biases due to maternity, child-rearing, and retirement.

The household's heads financial well-being measure is the reported annual labor earnings² converted to real dollars using the 1982-1984=100 Consumer Price Index. These earnings act as the direct reward of being involved in the labor force. It is crucial to notice that the reported labor earnings refer to the annual's income of the year before the survey. For that reason, the analysis covers 1972 to 2016 annual labor earnings.

An individual is categorized as displaced when he has experienced involuntary job loss due to plant closure or laid-off. Displacement occurs in the calendar year before the survey wave, and I only follow up the first displacement. All displaced workers must have four consecutive years of positive labor earnings before displacement occurs, to ensure previous labor market attachment. This definition is consistent with the one used by Jolly [6]. The other group subject to analysis are the never displaced individuals. They are the household heads who have never experienced job displacement during those years. Considering these selection rules, 31,688 individuals meet the sample criteria; of this group, 4,460 have experienced displacement between 1973 and 2017.

In the ordered logistic regression, I use specific demographic characteristics like age, race, years of education, the number of children under 18, marital status, blue-collar occupation, manufacturing industry, region of residence, wife's education, and age. Also, the potential experience equals age minus education minus six. If the individual has less than 12 years of education, then potential experience equals age minus 18. In this way, I avoid the overcompensation of less-educated workers by assigning them larger values of experience. Here education is the same over time, by drawing on each subject the reported education on the most recent survey.

Descriptive statistics

Table 1 displays each sample subgroup's means and its difference to highlight the main distinctions across groups. The mean of the head's annual labor income is \$12,962 less when the individual experiences displacement than a worker who has never experienced it. It reaffirms the findings of Lachowska where the reduction of work hours almost entirely explains annual earnings losses [10]. Furthermore, displaced individuals tend to be younger and less educated; therefore, they have lower potential experience than never displaced workers. As Addison show, education level and workers' skills play an essential role in the depth and length of displaced workers' earning losses [12]. The group subject to analysis tends to have more black people and fewer married individuals. Also, the sample is employed more in blue-collar occupations than in manufacturing industries. This last trait is crucial to understand human capital transferability across occupations and its role in determining post-displacement earnings.

² This measure includes total wage, earnings from overtime, bonuses, commissions, total salary income, labor portion of farm, business, and roomers' income.

Table 1. Descriptive Statistics by Displacement Status

	Never displaced (mean)	Displaced (mean)	Mean difference
Head's annual labor income	28818	15856	12962
Age	40	37.5	2.50
Education	13.5	12.2	1.3
Black	24%	34%	-11%
Married	92%	86%	6%
Number of children under 18	1.7	1.6	0.1
Potential Experience	18.6	16.8	1.8
Manufacturing	22%	11%	11%
Blue collar	35%	17%	18%
Age wife	35	30.5	4.5

Notes: Mean calculations use data from all years per observation.
Total number of observations: 528 609 Number of observations if displaced: 9 526 Source: 1973-2017 PSID waves.

RESULTS

Transition matrices

Table 2 indicates transition probabilities by displacement status for labor income of household head. The columns show the relative time changes for never displaced and displaced individuals. For example, column $t + 4$ specifies the change from the year of displacement to four years after displacement. At the same time, the rows specify the movement made for the individual in a given period. As previously explained, Upward 8 refers to the movement of eight deciles up. Also, the entries in black show the mean differences between displacement status, these are significant at the 5% significance level.

Table 2. Transition matrices

Movement	t-4		t-2		t	
	Never displaced (%)	Displaced (%)	Never displaced (%)	Displaced (%)	Never displaced (%)	Displaced (%)
Upward 9	0.0886	0.0000	0.1466	0.0000	0.0703	0.0000
Upward 8	0.2444	0.0448	0.3177	0.2242	0.2658	0.2242
Upward 7	0.1497	0.0897	0.3360	0.3812	0.7790	0.4484
Upward 6	0.4613	0.8969	0.7271	0.6278	0.9165**	0.7623**
Upward 5	1.0692	1.2780	1.4267**	0.8744**	1.6710**	1.1435**
Upward 4	1.4664***	1.4798***	2.4439***	1.3677***	2.9297***	1.8161***
Upward 3	3.3879***	5.5157***	4.8298***	3.2287***	5.0345***	2.6233***
Upward 2	6.8491***	6.7040***	7.8909***	5.2691***	8.3155***	6.7937***



	t-4		t-2		t	
Upward 1	17.6453***	18.1166***	16.5852***	11.8161***	14.6178***	11.0762***
Immoble	40.2578***	30.6278***	31.6521***	25.4709***	26.6145***	14.2601***
Downward 1	14.1840***	16.7937***	13.9030***	16.1211***	13.7991***	14.8879***
Downward 2	5.3156***	8.4529***	6.9408***	10.4709***	7.8359***	12.1076***
Downward 3	3.2291***	4.0135***	4.1700***	9.7758***	5.5508***	7.1973***
Downward 4	1.8513***	3.2735***	3.3849***	7.5785***	4.0142***	7.6233***
Downward 5	1.6802***	1.3229***	1.9857***	2.6682***	2.5356***	6.0090***
Downward 6	1.0876***	1.3004***	1.4755***	2.5112***	2.1354***	5.5157***
Downward 7	0.5652	0.0000	1.0570***	0.4709***	1.8177***	4.3722***
Downward 8	0.3360	0.0897	0.5163***	1.1211***	0.8126***	1.6592***
Downward 9	0.1314	0.0000	0.2108	0.0224	0.2841**	1.4798**

	t+2		t+4		t+6	
Movement	Never displaced (%)	Displaced (%)	Never displaced (%)	Displaced (%)	Never displaced (%)	Displaced (%)
Upward 9	0.1161	0.0000	0.1619***	0.1121***	0.2688	0.0000
Upward 8	0.4369	0.0673	0.7118	0.0224	0.7943	0.4036
Upward 7	1.0814	0.4036	1.1150	0.7623	1.0509	0.5381
Upward 6	1.1487	0.8520	1.6252	1.2108	2.0621**	1.4350**
Upward 5	2.1262**	1.1883**	2.1201***	1.2780***	2.7097***	1.7713***
Upward 4	3.6231***	1.6143***	4.3197***	4.4395***	3.9134***	3.5426***
Upward 3	5.2361***	4.4395***	5.8685***	6.1883***	6.8217***	6.0090***
Upward 2	8.5599***	7.6009***	9.2931***	7.5785***	9.1556***	8.6771***
Upward 1	14.0710***	12.0179***	13.9549***	11.7937***	13.8755***	10.8296***
Immoble	23.6512***	15.3139***	21.7389***	17.4664***	19.8692***	15.9417***
Downward 1	12.4824***	14.4170***	11.5660***	9.9327***	10.7320***	10.0448***
Downward 2	8.2789***	10.6502***	8.1597***	11.3453***	8.1689***	9.7309***
Downward 3	6.0915***	7.2646***	5.9632***	5.3587***	6.7728***	7.0628***
Downward 4	4.1669***	7.0179***	4.2677***	5.6726***	4.2250***	7.0179***
Downward 5	3.0977***	5.3812***	3.2688***	4.7982***	3.3451***	6.5471***
Downward 6	2.4103***	5.3363***	2.3095***	5.3812***	2.3706***	3.1166***
Downward 7	1.7689***	3.7444***	1.7932***	3.3184***	2.0040***	3.2960***
Downward 8	1.2159***	1.7489***	1.3197***	2.0404***	1.2892***	2.8027***
Downward 9	0.4369**	0.9417**	0.4430**	1.3004**	0.5713***	1.2332***

Notes: For the never displaced group, a random starting point is selected, while for the displaced ones, the period t is determined as the year of displacement. The table shows the results of a two-tailed test to determine if the difference among each group is statistically significant.

*** p < 0.01, ** p < 0.05, * p < 0.1 Source: 1973-2017 PSID waves.



Four years before displacement, I observe a difference of ten pp. in the probability of maintaining the worker's position in his income decile. Upward and downward mobility is almost the same for both groups. Nevertheless, downward mobility is more likely to happen when the individual had experienced displacement. This outcome highlights the possible existence of productivity differences before displacement among groups. If future displaced workers have low productivity, it reflects on a proportional decrease in wage. Also, it explains the tendency to move to a lower income decile instead of keeping their income distribution position.

Two years before displacement, the immobile gap becomes shorter, and downward mobility tendency remains the same. Comparing results from four to two years before displacement, the probability of moving downward rises. It points out productivity differences among displacement status. Furthermore, a repeated decrease of the annual labor earnings acts as a sign of the less productive time. The latter can result in workers being laid-off due to the inability to increase their productive time or a general decrease in the enterprise's production, leading to a plant closure.

In the year of displacement, there is a notorious difference in the mobility probabilities. The probability of keeping the deciles position is 12 pp. less when the worker had experienced displacement. Also, the cumulative probability of moving to a low decile is 60.86% so, if someone is displaced, the annual labor income decreases dramatically, blocking them from moving upward or even keeping their income distribution position. As Lachowska mention, the losses seen in the year of displacement can be explained mainly by the loss of work hours, creating conditions that make workers prone to downward mobility [10]. Since displacement is an involuntary job loss, separated workers do not have immediately new sources of income. Therefore, it is imperative to consider job search costs during the following years of displacement that intensify the probability of moving to a lower decile.

After two years of being displaced, the long-run impact of displacement is the increased probabilities of moving downward in the labor income distribution. Gibbons explain this outcome through the adverse selection model [11]. Following displacement, the labor market has a pool of displaced workers where firms cannot distinguish between those who experienced laid-offs or plant closures. On the one hand, if the worker's job loss is due to laid-off, it implies low productivity. On the other hand, if he is unemployed because of a plant closure, it does not necessarily relate to poor working skills. Assuming perfect information, firms could differentiate between these groups. Nevertheless, laid-off workers have the incentive to act as plant closure workers creating a market for lemons as Akerlof explained [18]. In this market, firms will assume that every displaced worker lost his job because of low productivity, consequently offering low wages or all around avoiding hiring them.

Four years after displacement, there is a higher probability of going two deciles down and a decreased probability of large movements to bottom deciles. The difference in probabilities of being immobile or moving upward is shorter than two years after displacement. Moreover, six years after displacement, there is still a negative effect of being displaced in a greater probability of moving downward. However, the differences in immobility and upward mobility among groups appear to close up. These outcomes



show that if an individual experiences displacement, the effects of earning losses remain up to at least six years later, keeping the worker prone to downward mobility. Nevertheless, as time goes by, he may be able to find new career paths and income sources that provide some security in his annual labor income flow.

Ordered Logistic Regression

Another way of showing the long-term impact of displacement is through the ordered logistic regression marginal effects. The first step is to build the earnings equation from which I can estimate the income distribution. Table 3 presents four different sets of earnings equations made with fixed-effects linear regressions. The rows specify the analyzed time period, while the columns denote which regression is displayed. Each of them varies according to the control variables added, and all of them use the natural logarithm of the annual head's labor income as dependent variable.

Table 3. Fixed-effects Regression Estimates

	(1)	(2)	(3)	(4)
t-4	-0.0355 (0.0230)	-0.0345 (0.0250)	-0.0142 (0.0311)	-0.0041 (0.0310)
t-2	0.0297 (0.0189)	0.0144 (0.0205)	0.0445* (0.0248)	0.0323 (0.0248)
t	-0.2570*** (0.0284)	-0.2060*** (0.0324)	-0.1990*** (0.0393)	-0.1770*** (0.0397)
t+2	-0.4130*** (0.0269)	-0.3830*** (0.0318)	-0.4260*** (0.0426)	-0.4070*** (0.0430)
t+4	-0.2070*** (0.0217)	-0.1890*** (0.0251)	-0.1320*** (0.0362)	-0.1120*** (0.0357)
t+6	-0.0858*** (0.0218)	-0.0998*** (0.0270)	-0.0379 (0.0345)	-0.0275 (0.0343)
Observations	111,297	90,322	68,055	68,045
R-squared	0.0090	0.0640	0.0740	0.0850
Number of id	20,388	16,036	15,079	15,079

Notes: Robust standard errors in parentheses.

All regressions used as dependent variable the natural logarithm of head's labor income and its standard errors are clustered by observation id.

Estimates from regression (1) don't have control variables added.

Estimates from regression (2) have quadratic potential experience as the control variable.

Estimates from regression (3) have quadratic potential experience, race, and years of schooling as control variables.

Estimates from regression (4) have quadratic potential experience, race, years of schooling, number of children under 18 years, marital status, wife's age, dummy variable of blue-collar occupation, and a dummy variable of the manufacturing industry as control variables.

*** p < 0.01, ** p < 0.05, * p < 0.1 Source: 1973-2017 PSID waves.



The first regression does not have control variables mimicking the transition matrices results. Its outcomes keep the transition matrices' main conclusions where displacement impact is more significant during displacement and two years after it than in other periods. The adverse selection model can explain those outcomes. It states that displaced workers' market signal is low productivity due to asymmetric information on the displacement causes. Furthermore, unemployment leads to a lack of number of hours worked. Then, following displacement, this market signal usually generates hourly wage reductions. After these immediate effects, displaced workers slowly return to the parameters before displacement because of new income sources.

When I add control variables, the magnitude of the results is different. The second regression follows the equation proposed by Mincer [19], controlling by quadratic potential experience. Addison explore one possible explanation of these differences [12]. They find that higher education reduces earnings losses, and unskilled displaced workers experience higher losses than their counterparts. These conclusions help explain the differences observed in the magnitude of the regressions. In this last regression, the annual labor income takes into account the potential experience and education years.

The third regression includes quadratic potential experience, race, and years of schooling, which shows some significant changes when compared to the previous results. These outcomes maintain the tendency previously observed; the effect is more significant in the years following displacement and, eventually it begins to disappear. The addition of demographic traits such as ethnicity and education years mitigates the harmful effect of displacement in t and $t + 4$, but there is an increased impact two years later. The depreciated value of displaced workers in the following years helps to explain the result from the adverse selection model previously discussed.

Furthermore, the fourth regression includes additional control variables like the number of children under 18 years, marital status, wife's age, and if the worker had a blue-collar occupation or belonged to the manufacturing industry. There is a similar pattern here to that of the preceding regressions, and the main difference is a shorter magnitude of the effect in every period. Before displacement, there is no significant difference among displacement status. In the period t being displaced reduces the annual labor income by 17.7%, this effect increases in $t + 2$ where a displaced worker has 40.7% less labor income than a never displaced worker. Furthermore, in $t + 4$, there is still a reduction of earnings, but it is smaller than the effect in the previous years. After six years, the effect is no longer significant.

In general, incorporating other individual characteristics does not change the main conclusions where the most negative impact is showed two years after displacement. It occurs due to the labor market signaling of the pool of displaced workers where the firms identifies them as unskilled employees. It provokes fewer hours dedicated to work because they use a significant portion of their time searching for a job fulfilling their reservation wages. From the previous results, I estimate the annual labor income distribution to identify its lower and upper bounds; these will act as the response variable in the ordered logistic regression.

Table 4 shows the clustered ordered logistic regression results. The rows present the analysis period, and the column identifies the corresponding estimate. There is a negative



effect of being displaced from two years before displacement until six years after it. In the displacement year, displaced workers experience 8.6% lower probability of being in a higher income decile than never displaced individuals. This effect increases after two years, keeping consistency with all the previous results, where being displaced results in having a 20.39% less probability of moving one decile up. The tendency remains the same, and six years after, some vestiges of the effect remain. All these negative impacts are significant at a 1% level since displacement occurs.

Table 4. Ordered Logistic Regression Estimates

Head's labor income	
t - 4	2.3160*** (0.118)
t - 2	-0.1670* (0.0971)
t	-8.6590*** (0.118)
t + 2	-20.3900*** (0.213)
t + 4	-5.9920*** (0.110)
t + 6	-0.7350*** (0.111)
Observations	68,045
Number of id	15,079

Notes: Robust standard errors in parentheses.
 The dependent variable of the regression is the head's labor income deciles distribution generated by the predicted values based on the estimates of Fixed-effects fourth regression.
 *** p < 0.01, ** p < 0.05, * p < 0.1 Source: 1973-2017 PSID waves.

The pre-displacement gap is less significant, which corroborates the hypothesis stated by Gibbons who says that wages before displacement should not differ among groups [11]. Moreover, it is worth noticing that the effect of displacement begins with a relatively small negative shock, and it increases two years after it. The job searching costs or the labor market signal of low productivity due to displacement can explain these annual losses on earnings increases

Table 5 shows the predicted probabilities of being in each decile. Its columns are each income decile, whereas the rows are the time subject to analysis. It displays the calculation of marginal effects for each possible outcome of the ordered logistic regression. The impact of displacement is not significant at 5% four years before displacement. However, two years before displacement and the following periods, every effect is significant at 1% level. Also, no marginal effects are significant in the sixth income decile.



Table 5. Ordered Logistic Regression Marginal Effects

	First Decile (%)	Second Decile (%)	Third Decile (%)	Fourth Decile (%)	Fifth Decile (%)
t-4	0.0473*	0.0571*	0.3322*	0.5034*	0.8079*
t-2	-0.6567***	-0.7942***	-4.6162***	-6.9953***	-11.2257***
t	2.4556***	2.9694***	17.2603***	26.1555***	41.9731***
t+2	5.7833***	6.9934***	40.6507***	61.6003***	98.8534***
t+4	1.6994***	2.0550***	11.9449***	18.1006***	29.0471***
t+6	0.2084***	0.2520***	1.4646***	2.2194***	3.5615***
	Sixth Decile (%)	Seventh Decile (%)	Eighth Decile (%)	Nineth Decile (%)	Tenth Decile (%)
t-4	0.0170	-1.5458*	-0.2103*	-0.0088*	-0.0002*
t-2	-0.2367	21.4788***	2.9219***	0.1220***	0.0023***
t	0.8849	-80.3099***	-10.9250***	-0.4562***	-0.0085***
t+2	2.0841	-189.1425***	-25.7301***	-1.0745***	-0.0201***
t+4	0.6124	-55.5777***	-7.5605***	-0.3157***	-0.0059***
t+6	0.0751	-6.8145***	-0.9270***	-0.0387***	-0.0007***

Notes: Ordered logistic regression marginal effects (dy/dx) using predicted deciles from fixed-effects regression as the dependent variable *** p < 0.01, ** p < 0.05, * p < 0.1
Source: 1973-2017 PSID waves

In contrast with the transition matrices results, adding control variables reduces the effects four years before displacement. It means that the differences among groups are not different from zero in this period. Previous productivity similarities between groups can explain these results. It is more likely to be in the seventh decile two years before displacement, showing labor market attachment. Nevertheless, it is more probable that the individual is in the fifth decile in the displacement year and less likely to be in the seventh decile. The results denote the significant impact of being displaced in the moment when it happens. As Jolly explains, the immediate effect of involuntary job losses is the reduction of the labor earnings that are the reward of being involved in the workforce [6].

These adverse effects become more prominent two years after displacement than the year of displacement. The probability of being in the fifth decile is 57 pp. higher than the same point in the year of displacement. Moreover, there is tremendous increase of the probability of being in the fourth and third decile. It shows that being displaced implies a movement of at least two deciles downward the year of displacement and two years after it. The analysis made by Ormiston sheds some light on these results [16]. He explores the role of the worker's depreciated value following displacement. It can emerge because of foregone returns of specific human capital lost on the previous employer-employee relationship or by a mismatch of the skills set denoting variations in the displaced workers' potential productivity.

This effect leaves sequels four years after, where it exhibits a negative probability of being in any decile up to the sixth one. Also, it is more likely to be in the fifth decile of



predicted annual labor income. These results explain that when the worker can look for other sources of income, either by employment or entrepreneurship, the effect of being displaced begins to vanish. For this reason, there is a deeper decline in the probability of being under the fifth decile. However, the difference of marginal predictions of being on the seventh decile and upward remains negative.

CONCLUSIONS

In this work, I argued that job displacement influences inter-temporal income mobility using annual labor earnings to measure financial well-being. For this, I used the Panel Study of Income Dynamics (1973-2017), the most comprehensive longitudinal data for the US population. This large data set allowed me to observe the income shock persistence due to an involuntary job loss.

My empirical strategy relies on the methodology proposed by [6], which consists of recovering transition matrices probabilities. My main contribution is the use of ordered logistic regression estimators to control for demographic traits that may affect income mobility. This addition allowed me to improve the biases of my estimations with the transition matrices. Moreover, I used clustered standard errors at the unit of analysis level, providing more precise coefficients. Also, by using an extensive period of analysis, I extended the years analyzed before displacement.

I found that displacement triggers a significant reduction of annual labor income, and this effect remained even four years after the job loss occurs. Also, displacement affects income mobility over time, and there were deep earnings losses that increased downward mobility not only when displacement occurred. Downward mobility is deeper two years afterward than in other periods. Displacement's negative influence on mobility mitigates as time goes by.

One area of improvement is the extension of the financial well-being measure used to study inter-temporal labor income mobility. It can be addressed by considering other measures of well-being like the couple's labor earnings, family income, wealth, and consumption expenses. Therefore, allowing the analysis of how family members' income influences income mobility and how wealth and consumption patterns change due to displacement. To conclude, the main findings of this work describe, comprehensively, the inter-temporal persistence of the adverse effects of an involuntary job loss.

AUTHORS' CONTRIBUTIONS

Nicolle Jaramillo had generated all the content embedded in this article

CONFLICTS OF INTEREST

Nicolle Jaramillo declares no conflicts of interest.

REFERENCES

- [1] Bruce C Fallick. A review of the recent empirical literature on displaced workers. *ILR Review*, 50(1):5–16, 1996.
- [2] Lori G. Kletzer. Job displacement. *Journal of Economic Perspectives*, 12(1):115–136, March 1998.
- [3] Louis S Jacobson, Robert J LaLonde, and Daniel G Sullivan. Earnings losses of displaced workers. *The American economic review*, pages 685–709, 1993.
- [4] Christopher J Ruhm. Are workers permanently scarred by job displacements? *The American economic review*, 81(1):319–324, 1991.
- [5] Ann Huff Stevens. Persistent effects of job displacement: The importance of multiple job losses. *Journal of Labor Economics*, 15(1, Part 1):165–188, 1997.
- [6] Nicholas Jolly. Job displacement and the inter-temporal movement of workers through the earnings and income distributions. *Contemporary Economic Policy*, 31(2):392–406, 2013.
- [7] Steve Berry, Peter Gottschalk, and Doug Wissoker. An error components model of the impact of plant closing on earnings. *The Review of Economics and Statistics*, pages 701–707, 1988.
- [8] Maury Gittleman and Mary Joyce. Have family income mobility patterns changed? *Demography*, 36(3):299–314, 1999.
- [9] Kenneth A. Couch and Dana W. Placzek. Earnings losses of displaced workers revisited. *American Economic Review*, 100(1):572–89, March 2010.
- [10] M Lachowska, A Mas, and SA Woodbury. Sources of displaced workers' long-term earnings losses (working paper no. 24217). *National Bureau of Economic Research*, 10:w24217, 2018.
- [11] Robert Gibbons and Lawrence F Katz. Layoffs and lemons. *Journal of Labor Economics*, 9(4):351–380, 1991.
- [12] John T Addison and Pedro Portugal. Job displacement, relative wage changes, and duration of unemployment. *Journal of Labor economics*, 7(3):281–302, 1989.
- [13] David S Kaplan, Gabriel Martinez Gonzalez, Raymond Robertson, Naercio Menezes-Filho, and Omar Arias. What happens to wages after displacement?[with comments]. *Economia*, 5(2):197–242, 2005.
- [14] Daniel Fackler, Steffen Muller, and Jens Stegmaier. Explaining wage losses after job displacement: Employer size and lost firm rents. Technical report, IWH Discussion Papers, 2017.
- [15] Ben Kriechel and Gerard A Pfann. *Heterogeneity among displaced workers*. ROA Maasricht, 2003.
- [16] Russell Ormiston. Worker displacement and occupation-specific human capital. *Work and Occupations*, 41(3):350–384, 2014.
- [17] Thomas A DiPrete. Life course risks, mobility regimes, and mobility consequences: A comparison of sweden, germany, and the united states. *American journal of Sociology*, 108(2):267–309, 2002.
- [18] George A Akerlof. The market for “lemons”: Quality uncertainty and the market mechanism. In *Uncertainty in economics*, pages 235–251. Elsevier, 1978.
- [19] Jacob Mincer. Investment in human capital and personal income distribution. *Journal of political economy*, 66(4):281–302, 1958.

Análisis de la producción de maíz en España

José L. Gabriel^{1,2*}, Diana Martín-Lammerding¹, Raúl Allende-Montalbán¹, M. Mar Delgado¹,
José A. Rodríguez-Martín¹

¹Departamento de Medio Ambiente y Agronomía, INIA-CSIC, Carretera de la Coruña km 7.5, 28040 Madrid, España

²CEIGRAM, Universidad Politécnica de Madrid, c/Senda del Rey 15, 28040 Madrid, España

* Corresponding author/ Autor principal: gabriel.jose@inia.es

Analysis of the maize production in Spain

Abstract

Spain is a country where agricultural production has a relatively low weight in the national gross domestic product (only 3.16%), but it is a sector with a great strategic importance, more than 20 million tons of vegetable products exported per year, and a high level of domestic consumption. Within that production, the cultivation of corn is one of the most important crops on the surface within irrigation systems. This study aims to summarize the current situation of maize production in Spain in relation to the world situation. Currently, the two main constraints to increasing the area cultivated with maize and increasing its yield in Spain are the availability of water and the economic profitability. For this reason, this work summarizes the progress achieved until the present, but also the potential improvements that could improve their economic performance without increasing (or even decreasing) their environmental impact. These techniques require inevitably an improvement of the efficiency use of the agronomic inputs (fertilizers, diesel, pesticides, etc.), as well as, the improvement of water use. To achieve these greater efficiencies, different techniques have been identified such as adjusting the doses of water-nutrients-phytosanitary products, their application at right moments or even remote sensing, and the use of precision agriculture; all of them defined in greater detail in this manuscript. Therefore, farmers who wish to continue growing maize in Spain, and being able to improve their yields and reduce their environmental impact, must, above all, improve their production margins.

Keywords: cereals, yield, fertilization, irrigation, economic analysis, sustainable agriculture, precision agriculture.

Resumen

España es un país donde la producción agrícola tiene un peso relativamente bajo en el producto interior bruto nacional (solo del 3,16%), pero con una gran importancia estratégica ya que representa más de 20 millones de toneladas de productos vegetales exportados al año, además del alto nivel de consumo interno. Dentro de esa producción, el cultivo del maíz es uno de los cultivos con mayor importancia en cuanto a superficie dentro de los sistemas de regadío. El presente estudio pretende resumir la situación actual de la producción de maíz en España en relación a la situación mundial. A día de hoy, los dos principales factores limitantes para el aumento de la superficie cultivada de maíz y el aumento de su rendimiento



Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /
Edited by:
Gabriela Albán

Recibido /
Received:
14/10/2021

Aceptado /
Accepted:
08/01/2022

Publicado en línea /
Published online:
16/05/2022



en España son la disponibilidad de agua y la rentabilidad económica. Por eso, este trabajo resume los avances alcanzados hasta la fecha, pero también las mejoras potenciales que permitirían mejorar su rendimiento económico sin aumentar (o incluso disminuyendo) su impacto ambiental. Estas técnicas se basan en la mejora de la eficiencia de uso de los insumos agrícolas empleados (fertilizantes, gasoil, fitosanitarios, entre otros) así como la eficiencia en el uso del agua. Para alcanzar estas mayores eficiencias se han identificado distintas técnicas como el ajuste de las dosis de agua-nutrientes-fitosanitarios, su aplicación en los momentos clave o incluso la teledetección y el uso de agricultura de precisión, todos ellos definidos en mayor detalle en este trabajo. Por eso, los agricultores que deseen seguir cultivando maíz en España, además de ser capaces de mejorar su rendimiento y reducir el impacto ambiental, deberán, sobre todo, mejorar sus márgenes de beneficio.

Palabras clave: cereales, rendimiento, fertilización, regadío, análisis económico, agricultura sostenible, agricultura de precisión.

INTRODUCCIÓN

España es un país con una orografía compleja. Su superficie total es de 505,944 km², de los cuales un 14.8% están entre 0 y 200 m de altitud, 33.1% entre 200 y 500 m, 40.6% entre 500 y 1000 m y 11.5% km² por encima de los 1000 m de altitud, con picos máximos de 3,715 m en Canarias y de 3,479 en la península [1]. Esta orografía tan marcada, unida a su condición de península, con la influencia en el oeste del Océano Atlántico, en el norte del Mar Cantábrico, en el este del Mar Mediterráneo y en el sur del Estrecho de Gibraltar (todos ellos con aguas de temperaturas muy variadas), generan un sinfín de condiciones edafo-climáticas particulares y diversas (Fig. 1). Bajo estas condiciones, se encuentran climas que van desde el mediterráneo árido, al oceánico, pasando por el continental, el de alta montaña, el subtropical o incluso el tropical en las islas Canarias [2]. Y las precipitaciones medias anuales de las principales capitales de provincia oscilan entre los 200 mm registrados en Almería en el periodo entre 1981-2010, a los 1,791 mm registrados en Vigo para el mismo periodo. Una variabilidad similar se registra en las temperaturas, con medias para el periodo 1981-2010 que oscilan entre los 10.7°C en Soria y 19.2°C en Sevilla (21.5°C en las Islas Canarias), con máximas absolutas de 46°C en Córdoba, pero sólo de 35.2°C en La Coruña, y mínimas absolutas de -20.0°C en Albacete, pero sólo de 0.4°C en Melilla. De hecho, la influencia de la variabilidad interanual propia del clima mediterráneo, genera que estos valores cambien radicalmente de un año a otro. Sin embargo, la característica común para toda la superficie española es el periodo de sequía estival, donde las precipitaciones son muy escasas durante al menos 60 días, mientras que la evapotranspiración potencial es muy elevada debido al viento, las altas temperaturas y las muchas horas de sol diarias. Es precisamente durante este periodo de mayor sequía cuando se cultiva el maíz en España, ya que a lo largo del resto del año hay un elevado riesgo de heladas y un fotoperiodo inadecuado para la floración de determinados cultivos.



en superficie los calcisoles y gypsisoles, formados bajo condiciones áridas o semi-áridas. Y, en el lado opuesto, en la zona centro-occidental, se encuentran luvisoles, formados bajo condiciones de fuerte lavado de arcillas. Finalmente, en algunas cuencas de la zona sur hay una presencia importante de vertisoles, de alto contenido en arcillas expansibles y también con alto interés agrícola.

Considerando solamente la superficie agrícola (tierra ocupada por cultivos y barbechos, pero no las praderas), esta se reduce a 167,704 km², solo un 33% de la superficie total. En 2018, de esta superficie, el 18.1% eran barbechos, el 29.1% cultivos leñosos y el 52.8% cultivos herbáceos. Los casi 9 millones de hectáreas de cultivos herbáceos registrados en 2018, han permanecido relativamente constantes durante los últimos 10 años, oscilando entre los 8.72 y los 9.24 millones de hectáreas. El tamaño medio de las explotaciones agrícolas en 2016 fue de 18.25 ha/explotación (similar a las 16.5 ha/explotación de la UE), aunque este tamaño se reduce a 3.1 ha/explotación en el caso de áreas en regadío.

Según la FAO el maíz es el segundo cultivo en producción mundial, con 1,148 Mt, el 38.5% de la producción total de cereales, y solo superado por la caña de azúcar y seguido por el trigo [4]. Su importancia es aún mayor cuando se estima que su producción aumentará en 375 Mt hasta alcanzar unas 3,054 Mt en 2029. El objetivo es alcanzar dicho aumento principalmente en base a un incremento en el rendimiento y no por una mayor superficie cultivada. Por otro lado, la cada vez mayor concienciación a nivel global de que la producción agrícola debe reducir su impacto medioambiental (con normativas mucho más restrictivas) [5], fomenta que la cantidad de insumos agrícolas debe ser menor y estar mejor manejada. Por eso, producir más maíz con una mayor eficiencia económica, pero también con un menor impacto medioambiental, se convierte en un reto cada vez más esencial tanto para los agricultores españoles como para el resto del mundo.

SITUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN ESPAÑOLA FRENTE A LA PRODUCCIÓN MUNDIAL

Tanto la superficie cultivada a nivel mundial, como el rendimiento medio por hectárea han aumentado notablemente durante las últimas décadas, dando lugar a un aumento generalizado de la producción mundial (Fig. 2). La superficie cultivada total pasó de 105.6 millones de hectáreas en 1961, a 137.5 en 2002, con un punto de inflexión de 196.8 millones en 2018. En cuanto al rendimiento medio, el crecimiento ha sido más lineal, tanto a nivel mundial como a nivel regional. En este caso, los rendimientos medios mundiales pasaron de 1,942 kg de grano al 14% por hectárea en 1961 a 5,715 en 2018. Finalmente, como resultado de los incrementos en la superficie y el rendimiento, la producción de grano mundial pasó de 205.0 millones de Mg de grano al 14%, a 603.6 en 2002, donde de nuevo se produce un importante punto de inflexión en 2018 que alcanza los 1,124.7 millones de Mg de grano [4].

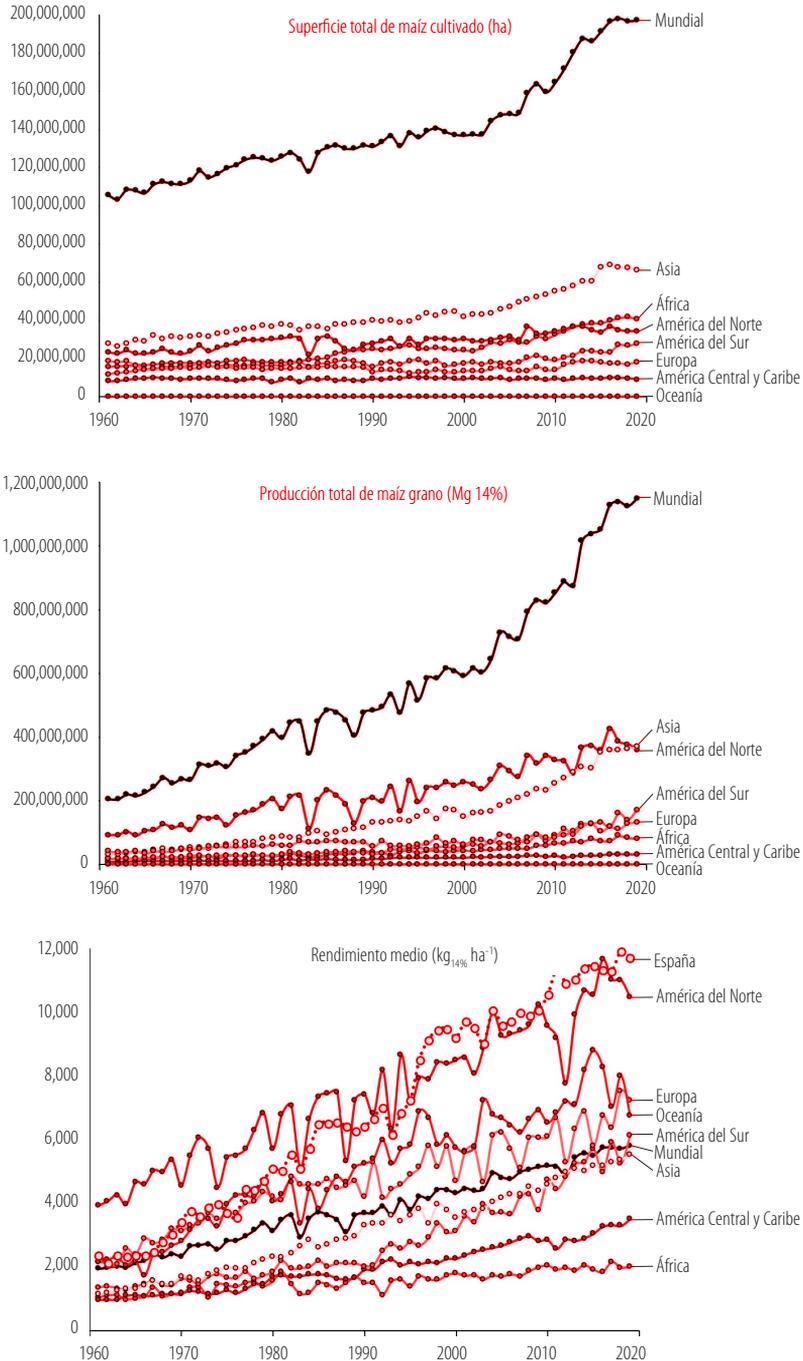
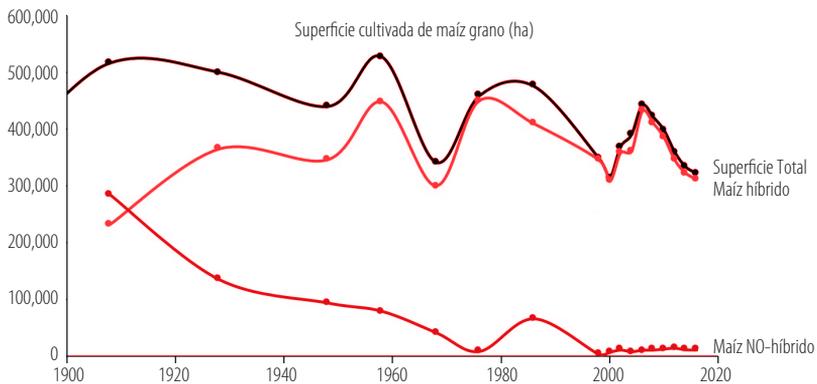
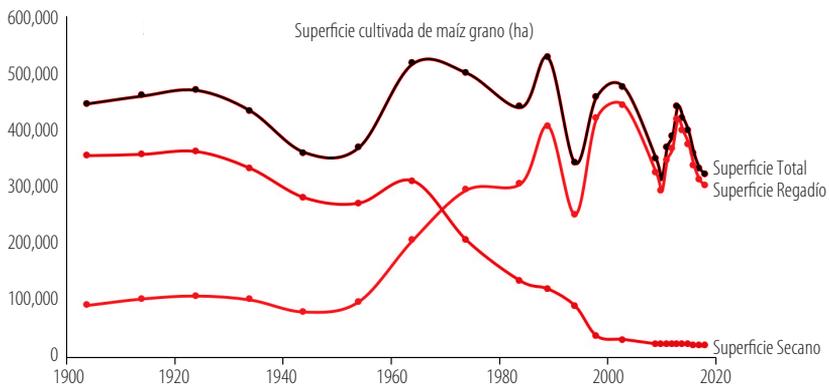


Figura 2. Superficie, Producción y Rendimientos obtenidos anualmente en las distintas regiones del mundo. Gráficos elaborados por los autores en base a los datos de FAOSTAT.



Si se considera los datos actuales en España, en 2018 la superficie cultivada de maíz grano fue de 322,370 ha (Fig. 3), representando solo el 0.16% de la superficie mundial. De esta superficie mundial, un 34% se concentra en Asia, seguidos de lejos por África (21%), América del Norte (17%) y América del Sur (13.5%). Por otro lado, la producción se presenta más igualada entre regiones (Fig. 2), dado que de los 1,125 millones de Mg de grano al 14% de humedad producidos en 2018, Asia mantiene un 32% de la producción total, pero América del Norte se eleva al 34%, mientras que América del Sur mantiene un 12%, Europa aumenta al 11% y África baja al 7%. En este caso la producción de España, en la línea europea, asciende al 0.34% de la producción mundial, con 3.8 millones de Mg de grano al 14%. Este incremento se debe, principalmente a que el rendimiento medio en España es actualmente uno de los más altos del mundo. Este rendimiento se elevó en España a los 11,919.6 kg de grano al 14% por ha (Fig. 2), ligeramente superior al rendimiento medio de América del Norte (11,017.5 kg de grano al 14% por hectárea) y muy por encima de la media mundial (5,715.1 kg de grano al 14% por hectárea) o incluso del rendimiento medio en Europa (7,528.2 kg de grano al 14% por hectárea).



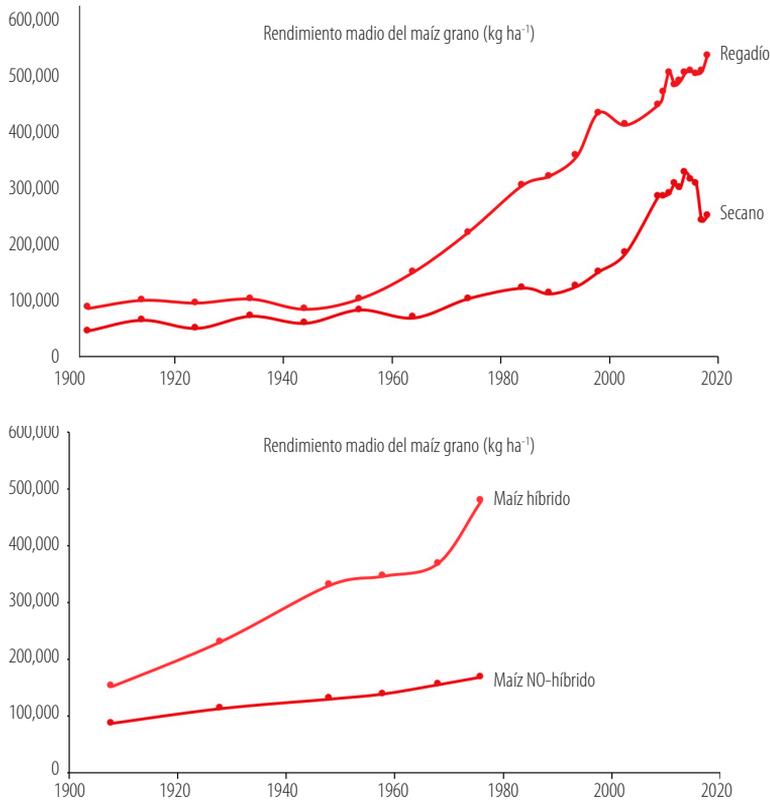


Figura 3. Superficie cultivada y rendimiento medio obtenido en España en función de la presencia de riego o no y del tipo de semilla utilizado. Gráficos elaborados por los autores en base a los datos de Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación de España.

EL REGADÍO COMO POTENCIADOR DE LA PRODUCCIÓN

Desde 1900 a 1960, los rendimientos medios observados en España (Fig. 3) no sufrieron variaciones importantes más allá de las fluctuaciones debidas al clima [1]. Ya en 1960, los rendimientos obtenidos en España fueron muy similares a los obtenidos de media mundial (~2,000 kg de grano al 14% por ha), en la misma línea de los kilogramos obtenidos de media en Europa o en América del Sur, y muy por debajo de los ~4,000 kg obtenidos en América del Norte. Durante los siguientes 20 años, el aumento en rendimiento fue similar en estas 4 regiones (América del Norte y del Sur, Europa y España), desmarcándose progresivamente de la media mundial. Este incremento, fue probablemente inducido en parte por la mejora de productos fertilizantes y fitosanitarios, así como por la aparición de los nuevos híbridos en el campo. Por ejemplo, en España, se pasó de solo un 45% de la superficie de maíz sembrada con semilla híbrida en 1964 a un 80% en 1984, y hasta un 98% en 1998 [1].



A partir de 1980, la producción en España creció a un ritmo mucho mayor que el resto de regiones mundiales, sobre todo entre 1990 y 1995. Estos grandes aumentos vinieron de la mano de la generalización del cultivo de maíz en regadío. Analizando los datos de superficie de maíz regada en 1964, se puede ver como solo el 40% de la superficie cultivada con maíz tenía riego. Sin embargo, en 1984 ya estaba regada el 70% de la superficie, hasta que, en 1998, coincidiendo con la gran tasa de aumento observada en los rendimientos, ya se alcanzaba el 92%. Cabe destacar que los rendimientos observados de secano en España, se ajustan mejor a los rendimientos medios obtenidos a nivel mundial (5,749 kg de grano al 14% por ha en 2018), mientras que los obtenidos en regadío han alcanzado una media de 12,328 kg de grano al 14% por ha en 2018 en España [1] (Fig. 4).

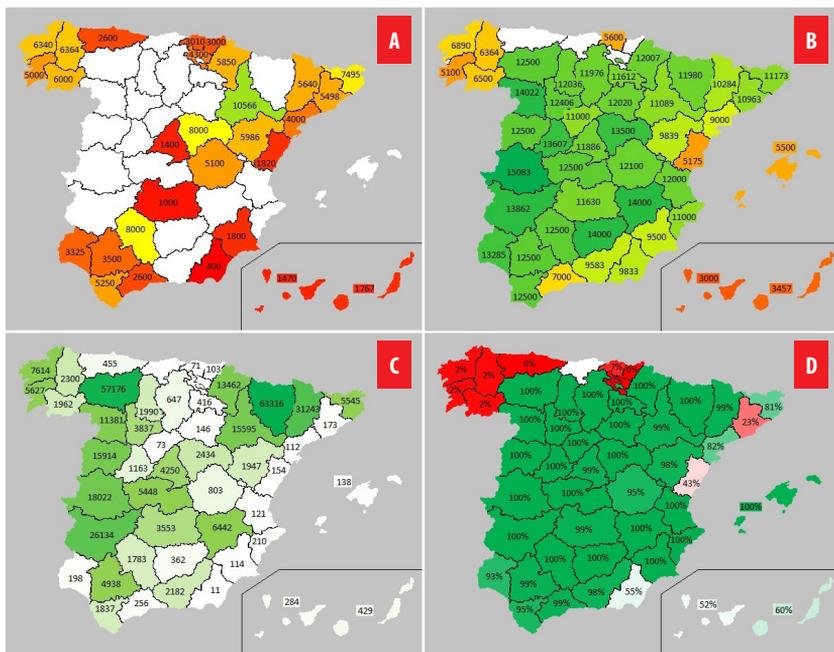


Figura 4. Datos provinciales de 2018 de rendimiento medio (en kg de grano al 14% por ha) obtenido en secano (a) y en regadío (b), superficie total cultivada con maíz en ha (c) y porcentaje de la superficie cultivada en regadío (d). Mapas elaborados por los autores en base a los datos de Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación de España.

No obstante, España tiene una gran variabilidad edafo-climática por lo que tanto la superficie cultivada, como el porcentaje de esta superficie bajo condiciones de riego y el rendimiento varían enormemente en función de la posibilidad/necesidad de riego. Aunque en casi todas las provincias españolas se puede encontrar maíz para grano, en general las regiones de este cultivo situadas en el este y el sur de España son testimoniales, ya que en estas zonas se suele destinar el agua de riego a cultivos de mayor rentabilidad económica como las frutas y hortalizas. Solo entre Huesca y León se concentra un tercio de la superficie total cultivada (si se añaden las de Lérida, ya



representan casi la mitad). En cualquier caso, la mayor parte de la producción de maíz se concentra entre el norte y el oeste de España (Fig. 4).

En cuanto al porcentaje de maíz en regadío, como ya se observó a nivel nacional, la mayor parte de las provincias presentan valores superiores al 95%. (Fig. 4) Sin embargo, cabe destacar que, en la Cornisa Cantábrica, donde las lluvias son más abundantes, el regadío es una técnica muy poco utilizada a la hora de cultivar maíz. En cualquier caso, en esta región no se observan grandes mejoras en el rendimiento cuando se introduce el riego, mientras en el resto de España se observan claras mejorías en los rendimientos medios con el riego. De hecho, al analizar los rendimientos por provincias se observa como en algunas de ellas se llega a rendimientos medios de hasta 15,083 kg de grano al 14% por ha, como en Cáceres en 2018, considerando que en esta provincia se integran datos de más de 18,000 ha [1].

EL MANEJO DEL AGUA

El agua es uno de los factores limitantes para la producción de maíz. La disponibilidad de agua permite que cada planta aumente su crecimiento y su rendimiento, pero también permite aumentar las densidades de siembra, por lo que el rendimiento por hectárea también aumenta considerablemente (Fig. 3). Para mejorar la disponibilidad de agua hay varias formas de actuar [6]. Por un lado, está la opción de aumentar el riego, pero como las reservas de agua de una cuenca son limitadas, cuanto más eficiente sea el sistema de riego (tanto en la forma de aplicar el agua como en el lugar y los momentos en los que se aplica), mayor es el potencial para regar más superficie. Por otro lado, está la opción de evitar que el agua que ya existe en el suelo se pierda. Una parte importante del agua del suelo se pierde por evaporación directa, sin ningún tipo de efecto positivo para el cultivo, sobre todo durante las fases en las que el maíz aún no cubre el suelo. Por tanto, contar con acolchados artificiales o vegetales que eviten esta evaporación directa (o que incluso protejan del viento y disminuyan la temperatura del suelo) pueden marcar la diferencia entre unos rendimientos económicamente sostenibles o no [7].

Otra parte importante de las pérdidas de agua de los suelos se producen por drenaje y/o escorrentía [8]. Para evitar el drenaje, se puede contar con tuberías de drenaje que permitan reciclar las aguas profundas, pero en el caso de parcelas regadas se busca ajustar el riego para evitar estos eventos de drenaje y el lixiviado de nutrientes asociado a él [9]. Con el fin de evitar la escorrentía, sobre todo en parcelas con pendiente, se debe recurrir a cubiertas vegetales (vivas o muertas) que favorezcan la velocidad de infiltración del agua a la vez que reducen la velocidad del movimiento del agua en superficie, aumentando en gran medida el agua realmente disponible para el maíz, y evitando a la vez la erosión de la capa superficial más productiva del suelo [10].

Finalmente, otra forma de mejorar la disponibilidad de agua sería utilizando la estructura natural del suelo para aumentar la capacidad de retención de agua [11]; para ello, técnicas como el no laboreo, potenciar el desarrollo de raíces todo el año (mediante el empleo de rotaciones y cubiertas vegetales) y el aumento de la materia orgánica del suelo, son herramientas clave para mejorar esta propiedad [12].



EL MANEJO DE LA FERTILIZACIÓN

Muy ligado al manejo del agua se encuentra el manejo de los nutrientes [6]. Los nutrientes que el maíz necesita provienen principalmente de dos fuentes: los nutrientes que se aplican externamente en forma de fertilizantes orgánicos o inorgánicos y los nutrientes que el propio suelo suministra de manera natural [13]. Empezando por los nutrientes que aporta el suelo, parte de ellos son compuestos iónicos que quedan retenidos formando complejos con las arcillas y la materia orgánica del suelo. Por este motivo, suelos ricos en arcilla y/o materia orgánica, suelen ser suelos fértiles, al ser capaces de retener de forma natural muchos nutrientes que se irán poniendo a disposición del cultivo a medida que los va necesitando [6].

Aunque el contenido de arcillas difícilmente se puede incrementar, la materia orgánica se puede aumentar de forma constante con los residuos de cultivo que se quedan en el campo, fomentando el crecimiento de raíces durante todo el año (incluyendo cubiertas vegetales), reduciendo las labores del suelo y/o aportando enmiendas orgánicas externas. Pero más allá de los nutrientes que se quedan retenidos en la materia orgánica del suelo, están los propios nutrientes que se generan por la mineralización de esa materia orgánica. Para el desarrollo óptimo del proceso de mineralización se requiere al mismo tiempo de la disponibilidad de agua y temperaturas apropiadas [14]. Por tanto, un aumento en el contenido de la materia orgánica del suelo es recomendable en casi todas las situaciones.

El aporte de fertilizantes externos permite suministrar al cultivo aquellos nutrientes que el suelo no es capaz de suministrar en cantidad suficiente para el correcto desarrollo del cultivo. En este caso, es importante conocer bien qué y cuántos nutrientes aporta el suelo y qué nutrientes (macro y micro) son los más limitantes. Según la ley de Liebig, el nutriente más limitante es el que marca el techo de producción, por lo que un mayor aporte de otros nutrientes, en general, no va redundar en mejores rendimientos hasta que la carencia del más limitante se corrija. Por tanto, los análisis de suelo y planta son fundamentales para evitar sobre-fertilizaciones que reducirían drásticamente la sostenibilidad económica y aumentarían el impacto medioambiental de una explotación.

La aplicación de un fertilizante adicional debe cumplir el principio de las 4 R's (por sus siglas en inglés) para que sea eficiente: cantidad correcta, momento correcto, fertilizante correcto y lugar correcto. Si la cantidad aplicada es muy alta, una parte importante del fertilizante se perderá por lavado (contaminando acuíferos y masas de agua) [15] o por emisiones gaseosas (aumentando la concentración de partículas en suspensión en el aire y de gases de efecto invernadero) [16]. Por el contrario, si la aportación de fertilizante es muy baja, puede producir deficiencias de un nutriente concreto (o de varios) y dar lugar a mermas en el rendimiento. El momento de aplicación también tiene gran importancia, ya que si se aplica demasiado pronto también se perderá antes de que el cultivo pueda asimilarlo, pero si se aplica tarde el maíz no podrá usarlo a tiempo [6]. Por eso, es importante tanto conocer que los mayores requerimientos nutricionales en el maíz se producen entre la fase de 4-6 hojas y la floración, cuando el crecimiento de la biomasa es más rápido. Igual de importante es conocer la velocidad con la que los nutrientes están disponibles con cada tipo de fertilizante, porque fertilizantes que están rápidamente disponibles (como el nitrato amónico) actúan de diferente manera que



fertilizantes de liberación lenta (como los fertilizantes con inhibidores, los encapsulados o los fertilizantes orgánicos). Por tanto, es necesario ajustar la fecha de aplicación lo máximo posible para que la liberación se acople a la demanda real del maíz [17].

En este sentido, se enlaza con el principio del fertilizante correcto, ya que se debe usar en cada momento el fertilizante por composición que se ajuste mejor a la forma de absorción del cultivo. Sin embargo, esto también afecta a la calidad del fertilizante o a la forma de aplicarlo, ya que no todas las presentaciones funcionan igual. Por último, es importante aplicar el fertilizante cerca de las raíces y favorecer que puedan ser absorbidos, sobre todo, en el caso de nutrientes poco móviles como el P o el K. Por tanto, aplicar en superficie es solo interesante si los nutrientes son altamente solubles y se incorporan con un riego o una lluvia. Si no lo son, sería más recomendable incorporarlos bien con una labor ligera, inyectándolos directamente o incluso aplicándolos con la sembradora. No obstante, si la dosis es muy alta puede producir fitotoxicidad.

En el caso de España, no hay datos específicos del consumo de fertilizantes asociados únicamente a la producción de maíz. Según distintos informes de la Asociación Nacional de Fabricantes de Fertilizantes [18], ni el consumo total de fertilizantes ni la distribución del consumo por tipos de fertilizantes han sufrido grandes cambios en las últimas dos décadas (Fig. 5). Por ello no cabe esperar grandes cambios para el maíz. Para el cálculo de este consumo total por parte de los agricultores se considera tanto el total de fertilizantes de producción nacional (en torno a los 4.5 millones de Mg de producto terminado en 2018), como el total de fertilizantes importados (en torno a los 3.0 millones de Mg en 2018) y a esto se le descuenta el total de fertilizantes exportados (en torno a los 2.3 millones de Mg en 2018). Las mayores variaciones interanuales se deben más al precio puntual de los propios fertilizantes que a cambios reales en las prácticas culturales de los agricultores.

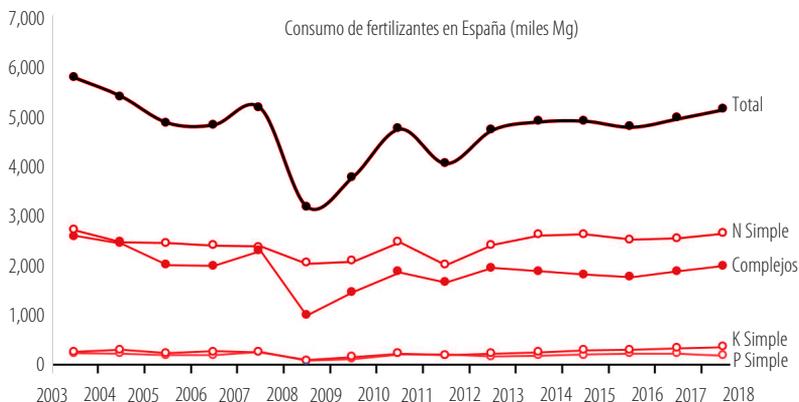


Figura 5. Consumo total de fertilizantes de la agricultura española. Gráficos elaborados por los autores en base a los datos de ANFFE.

Los Balances Nacionales de N y P que elabora el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación [1] señalan que el grupo de cultivos de “Cereales en regadío” suponen en torno a 1/3 del peso de la superficie cultivada corresponde al maíz. Para estos cereales



de regadío en España se estimó en 2017 un consumo de 189,466 Mg N y 32,233 Mg P en forma de fertilizantes minerales, así como de 52,958 Mg N y 14,240 Mg P en forma de otros fertilizantes orgánicos. Según estas estadísticas se volatilizaron 25,737 Mg N procedentes del abonado, a lo que se deben añadir otros 3,133 Mg N que se pierden en forma de otras emisiones gaseosas, que quedaron compensadas en parte con las 10,698 Mg N que se estima que se incorporan a esos suelos mediante procesos de deposición [1]. Con estos datos, se estiman unas pérdidas anuales medias de 83.9 kg N por ha, de las cuales 25.5 son en forma gaseosa y 58.4 en forma de lixiviado o de escorrentía. En cuanto al P, las pérdidas anuales se estiman en 3,8 kg P/ha, sin contabilizar el P que queda inmovilizado en el suelo [1]. Estos datos indican que, considerando el N y el P extraído por el maíz en el grano y la paja (en torno a los 14.89 kg N y 4.36 kg P por Mg grano al 14% y a los 1.00 kg N y 0.29 kg P por Mg de paja seca), la eficiencia en el uso de los fertilizantes puede aumentar aun enormemente.

LA SEMILLA

Desde los años 60, existe una mejora muy importante en el potencial de rendimiento de los distintos híbridos frente a variedades tradicionales (con una diferencia máxima registrada en 1998 de 3,377 frente 9,585 kg de grano al 14% por ha de rendimiento medio en España [1]). Estas diferencias se estiman aún mayores en la actualidad, ya que la mejora en estas variedades no híbridas no ha sido destacada mientras que el rendimiento potencial de los nuevos híbridos sí que ha experimentado un importante crecimiento. Estos híbridos de calidad aseguran mejores tasas de germinación, lo que permite ajustar mejor la dosis de siembra y evita problemas de mala nascencia. Por otro lado, garantizan una homogeneidad mayor entre plantas, lo que facilita el manejo integral de la parcela a la hora de realizar operaciones en campo como la aplicación de fitosanitarios, tratamientos mecánicos del suelo, o incluso, la cosecha. También se incluyen en los planes de mejora la mayor resistencia del cultivo frente a estreses bióticos (plagas y enfermedades) y abióticos, (déficit o exceso hídrico y temperaturas demasiado altas o bajas). Las nuevas variedades aseguran mejores tasas de translocación de nutrientes de la planta al grano, así como un mayor tamaño de las mazorcas, con más granos y de mayor tamaño [19].

En base a los datos de rendimiento, facilitados por las grandes empresas de semillas con distribución en España, los rendimientos a nivel de parcela registrados alcanzaron valores máximos de hasta 22,454 kg grano al 14% por ha en 2020, hasta 20,600 en 2019 o hasta 23,590 en 2018. Estos rendimientos se obtuvieron principalmente en las zonas del norte de España y, aunque varía con los años, las provincias que más veces aparecen en las primeras posiciones de estos concursos fueron León, Huesca, Zamora, Lérida, Salamanca y Cáceres.

En cuanto a los ciclos de los híbridos con los que se alcanzan estos rendimientos, no siempre los ciclos más largos produjeron más, y se encuentran muy ajustados a la región en la que se cultiven. En base a los ciclos definidos por la FAO para el cinturón maicero estadounidense (que va desde el ciclo 200 -de unos 85 días hasta la maduración- y el 1000 -de más de 161 días hasta la maduración-), en León, por ejemplo, se alcanzaban estos rendimientos con híbridos de ciclo 400 (excepcionalmente el 500), en Zamora y Salamanca (ligeramente más al sur y con algo más de calor) se alternaban ciclos 400-500, mientras que en Huesca, Lérida y Cáceres (con menor altitud y mayores temperaturas estivales) se



recurrió principalmente a ciclos 700. Finalmente, según estas empresas, las principales características que buscan los agricultores entre los diferentes híbridos, más allá de los mejores rendimientos potenciales, varían por zonas. Por ejemplo, en el Valle del Duero se buscan variedades resistentes a la caída del tallo; en Galicia se buscan variedades resistentes a *Helminthosporium*; en el Valle del Ebro variedades resistentes al taladro (*Ostrinia nubilalis*), *Giberella* y al *Fusarium* de la mazorca; y en la zona Madrid, Castilla-La Mancha y Extremadura variedades resistentes a *Cephalosporium* y con alta calidad de grano.

Cabe destacar también el potencial de las semillas transgénicas, de gran uso a nivel mundial, o incluso las variedades mejoradas por las novedosas técnicas de edición génica. Pero, en cualquier caso, en Europa actualmente no están permitidas, a excepción de algunas variedades del tipo Bt (con genes procedentes de *Bacillus thuringiensis* para la lucha contra de la plaga del taladro), estando su uso potencial muy limitado a regiones muy concretas de España (y otras regiones de Europa), como el Valle del Ebro. Por eso en este trabajo no se han tenido en consideración.

LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN

Agrupando las técnicas anteriores se encuentra la agricultura de precisión, ya que trata de aplicar todos esos principios de eficiencia en el uso de agua, nutrientes, fitosanitarios y semilla, pero reduciendo la aplicación de estas técnicas a la escala de metros cuadrados en vez de a la escala de finca. Cada parcela o finca tiene variaciones intrínsecas en las propiedades del suelo, la fertilidad, el relieve, el microclima, entre otros, que hacen que los potenciales y las necesidades de cada zona sean distintas. Si se tiene la capacidad de identificar esa variabilidad, junto con la maquinaria adecuada, se puede ajustar la dosis de semilla, la dosis de fertilizante, el riego, los tratamientos fitosanitarios, etcétera, a cada una de esas zonas en vez de aplicar un valor medio para toda la parcela. De esta forma se evitan los gastos innecesarios derivados de la aplicación excesiva de insumos en las zonas poco productivas y el descenso de los beneficios derivados de los menores rendimientos en las zonas de mayor potencial de las zonas más productivas.

Para este fin existen muchas herramientas. Entre estas herramientas se encuentran los mapas de suelos (que pueden monitorizar textura, materia orgánica, pH, conductividad eléctrica, pedregosidad, contenido de agua, etcétera, y todo ello en superficie o a distintas profundidades), los mapas de rendimiento, mapas con diferentes índices de vegetación, las predicciones meteorológicas, etcétera. Toda esta cartografía se puede generar con muestreos de planta y/o suelo en campo, con el uso de sensores proximales, con sensores montados en la maquinaria o mediante teledetección a distintas distancias (dron, avioneta, satélite). Todo este flujo de datos públicos o privados se integra en las distintas plataformas (de nuevo públicas o privadas) que cada vez dan mayor servicio a los agricultores. No obstante, para ello hace falta una inversión tanto en información (y gestión de la misma) como en maquinaria que permita la aplicación de estos valores variables en el uso de semilla, fertilizantes y fitosanitarios, por lo que es necesaria una adaptación progresiva y superficies grandes y suficientemente variables como para rentabilizar esta inversión. En cualquier caso, en España se cuenta con numerosas empresas que ofrecen estos servicios (por ejemplo, AgriSat [20], FieldView [21], o HispatecAgro [22]), así como herramientas públicas de libre disposición (sigAGROasesor [23]).



EL FUTURO DEL MAÍZ EN ESPAÑA Y SUS PRINCIPALES LIMITANTES

A día de hoy, hay dos principales factores limitantes para el aumento de la superficie cultivada de maíz y su rendimiento que son: la disponibilidad de agua y la rentabilidad económica. El maíz es un cultivo altamente productivo, pero estos rendimientos no siempre dan lugar a mejor rentabilidad, ya que los costes de producción también son mayores y el precio del grano suele ser bajo. En las épocas en las que el precio del grano sube, la superficie cultivada en España tiende a subir, mientras que cuando baja de precio, la superficie también tiende a descender. En cualquier caso, el precio de los mercados locales depende en gran medida del mercado mundial, por ser un producto de fácil conservación y con una buena capacidad de transporte, por lo que los agricultores tienen poco poder de influencia en él. Sin embargo, la rentabilidad también se ve influida por el coste y la cantidad de insumos utilizados para su cultivo. En esta parte, los agricultores sí tienen un mayor margen de maniobra.

Finalmente, se encuentra el problema de la limitación de agua en una situación de cambio climático, donde el agua es cada vez un elemento más escaso para todos los ámbitos de la vida. En estas circunstancias, los cultivos con altas demandas de riego requieren ser muy eficientes a nivel económico y medioambiental, ya que, si no, tenderán a ser reemplazados por otros cultivos mejor adaptados. Por eso, los agricultores que deseen seguir cultivando maíz en España, además de ser capaces de mejorar sus márgenes de producción, deberán ser capaces de optimizar el uso de cada gota de agua utilizada.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer la financiación recibida por el proyecto Tech-Maiz (Financiado por el CYTED), al MCIN/ AEI/10.13039/501100011033/ (proyecto AGL2017-83283-C2-2-R) y a la Comunidad de Madrid (proyecto AGRISOST-CM S2018/BAA-4330), cofinanciado en el marco del Programa Operativo FSE y FEDER 2014-2020, que han resultado fundamentales para la preparación de este trabajo.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

José L. Gabriel concibió la investigación, reunió los fondos, diseñó la metodología, recopiló los datos, preparó las tablas y las figuras y redactó un primer borrador del manuscrito; Todos los autores participaron en el análisis de datos, de la validación de los resultados y de la revisión crítica del contenido del manuscrito hasta alcanzar la versión final del mismo.

CONFLICTO DE INTERÉS

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



REFERENCIAS

- [1] MAPA (2020). Anuarios de Estadística. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid, España. Recuperado de: <https://www.mapa.gob.es/es/estadistica/temas/publicaciones/anuario-de-estadistica/default.aspx>
- [2] Peel, M.C., Finlayson, B.L., McMahon, T.A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 11, 1633–1644. doi: <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>
- [3] Instituto Geográfico Nacional. 2021. Mapas de España. Recuperado de: <https://www.ign.es/web/catalogo-cartoteca/>
- [4] FAOSTAT (2021). Roma, Italia. Recuperado de: <https://www.fao.org/faostat/en/>
- [5] Comisión Europea, 2019. El Pacto Verde Europeo. Bruselas, Bélgica. Recuperado de: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?qid=1576150542719&uri=COM%3A2019%3A640%3AFIN>
- [6] Quemada, M., Gabriel, J.L. (2016). Approaches for increasing nitrogen and water use efficiency simultaneously. *Glob. Food Sec.* 9, 29–35. doi: <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2016.05.004>
- [7] Alonso-Ayuso, M., Gabriel, J.L., Hontoria, C., Ibáñez, M.A., Quemada, M. (2020). The cover crop termination choice to designing sustainable cropping systems. *European Journal of Agronomy* 114, 126000. doi: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126000>
- [8] Gabriel, J.L., Muñoz-Carpena, R., Quemada, M. (2012). The role of cover crops in irrigated systems: water balance, nitrate leaching and soil mineral nitrogen accumulation. *Agric. Ecosyst. Environ.* 155:50–61. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.03.021>
- [9] Gabriel, J.L., Quemada, M. (2017). Water Management for Enhancing Crop Nutrient Use Efficiency and Reducing Losses. En: Tei, F., Nicola, S., Benincassa, P., *Advances in Research on Fertilization Management of Vegetable Crops*. Springer Nature, Cham, Suiza. pp. 247–265.
- [10] Alonso-Ayuso, M., Quemada, M., Vanclooster, M., Ruiz-Ramos, M., Rodríguez, A., & Gabriel, J.L. (2018). Assessing cover crop management under actual and climate change conditions. *Science of the Total Environment* 621, 1330–1341. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.095>
- [11] Gabriel, J.L., Quemada, M., Martín-Lammerding, D., & Vanclooster, M., (2019). Assessing the cover crop effect on soil hydraulic properties by inverse modelling in a 10-year field trial. *Agricultural Water Management* 222, 62–71. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.05.034>
- [12] García-González, I., Hontoria, C., Gabriel, J.L., Alonso-Ayuso, M., & Quemada, M., (2018). Cover crops to mitigate soil degradation and enhance soil functionality in irrigated land. *Geoderma* 322, 81–88. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.02.024>
- [13] Jarvis, S.C., Stockdale, E.A., Shepherd, M.A., & Powlson, D.S., (1996). Nitrogen mineralization in temperate agricultural soils: processes and measurement. *Adv. Agron.* 57, 187–235. doi: [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60925-6](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60925-6)
- [14] Quemada, M. (2004). Predicting crop residue decomposition using moisture adjusted time scales. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 70, 283–291. doi: <https://doi.org/10.1007/s10705-005-0533-y>
- [15] McIsaac, G.F., David, M.B., Gertner, G.Z., & Goolsby, D.A., (2001) Eutrophication – nitrate flux in the Mississippi river. *Nature* 414, 166–167. doi: <https://doi.org/10.1038/35102672>
- [16] Schjoerring, J.K., Husted, S., Mäck, G., Høier, K., Finnemann, J., & Mattsson, M., (2000). Physiological regulation of plant-atmosphere ammonia exchange. *Plant Soil* 221, 95–102. Recuperado de: <https://www.jstor.org/stable/42950737>
- [17] Allende-Montalbán, R., Martín-Lammerding, D., Delgado, M.D.M., Porcel, M.A., & Gabriel, J.L., (2021). Urease Inhibitors Effects on the Nitrogen Use Efficiency in a Maize–Wheat Rotation with or without Water Deficit. *Agriculture* 11, 684. doi: <https://doi.org/10.3390/agriculture11070684>
- [18] ANFFE. (2021). Macromagnitudes Sectoriales 2020. <http://www.anffe.com/informaci%F3n%20sectorial/macromagnitudes%20sectoriales/2020/index.html>
- [19] Paliwal, R.L., Granados, G., Lafitte, H.R., & Violic, A.D., (2001). El maíz en los trópicos: Mejoramiento y producción. Ed. FAO, Roma, Italia.
- [20] AgriSat. 2021. Recuperado de: <https://agrisat.es/>



- [21] FieldView. 2021. Recuperado de: <https://climatefieldview.es/>
- [22] HispatecAgro. 2021. Recuperado de: <https://www.hispatec.com/>
- [23] sigAGROasesor 2021. Recuperado de: <https://www.agroasesor.es/es/>

Generación de maíces especializados para mejorar la salud y nutrición en 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.

²INIFAP, Laboratorio Nacional de Calidad de Maíz. Coatlinchan, Texcoco, México.

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

Specialty maize generation to improve health and nutrition in Mexico

Abstract

Due to the great maize genetic diversity, over the time selection have been practiced to obtain textures, flavors, aromas for specific uses. At present, this selection is still valid by farmers and also by researchers who take advantage of new technological advances to efficiently assist selection, and to identify maize with specific characteristics, so it is possible "to tailored" bio-fortified, specialty and quality maize varieties according to the main forms of uses, consumption, and exploitation, that provide greater value added, and that allow the development of bio-active compounds and functional foods. Likewise, for the selection of maize with greater digestibility that impact and make more efficient livestock production. The interdisciplinary interaction between maize breeding programs with researcher groups specialized in disciplines related to food technology, can generate bio-fortified specialty maize which contain bio-active and nutraceutical compounds. INIFAP's maize program at Bajío region in Mexico, has implemented strategies to generate improved bio-fortified, bio-active and functional maize varieties, which have an impact on the health and nutrition of consumers. With a view to influencing the strategies described above, emphasis has been placed on maize germplasm development, focused on implementing research lines to generate: high oil content maize; white kernel maize with nixtamalera-tortillera quality; yellow kernel maize; high-quality protein maize (QPM); pigmented (such blue maize); popcorn; forage quality; fusarium and Aflatoxin contamination resistance; among others. This paper presents the advances and achievements obtained in these research lines. Based on the presented information, it is possible to say that we are at the forefront of great challenges and opportunities in interdisciplinary maize research in Latin America. That will allow us to develop genetic materials that, in addition to face imminent production risks, we can select specialty bio-fortified maize varieties, with value added, which allow the development of bio-active components, functional foods and also development of new industrial products.

Keywords: bio-fortified maize, functional foods, bio-active components, added value, maize breeding.



Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /
Edited by:
Gabriela Alban

Recibido /
Received:
16/11/2021

Aceptado /
Accepted:
29/12/2021

Publicado en línea /
Published online:
16/05/2022



Resumen

Gracias a la gran diversidad genética de maíz existente, a través del tiempo se ha practicado selección hacia maíces con texturas, sabores, aromas y usos específicos. En la actualidad, esta selección sigue siendo vigente tanto por los productores, como por los investigadores quienes aprovechan los avances tecnológicos para asistir la selección de manera eficiente, e identificar maíces con características específicas, por lo que es posible “confeccionar” maíces bio-fortificados, especializados y con calidad de acuerdo a las principales formas de consumo, utilización y aprovechamiento; que aporten mayor valor agregado y que permitan desarrollar componentes bio-activos y alimentos funcionales. Así mismo, para la selección de maíces con mayor digestibilidad que impacten y hagan más eficiente la producción pecuaria. La interacción interdisciplinaria de los programas de mejoramiento genético de maíz con grupos de investigación especialistas en disciplinas relacionadas con la tecnología de alimentos, pueden generar maíces especializados y bio-fortificados que contengan compuestos bio-activos y nutracéuticos. El programa de maíz del INIFAP, en la región del Bajío, en México, ha implementado diversas estrategias para generar maíces mejorados biofortificados, bio-activos y funcionales que tengan un impacto en la salud y nutrición de los consumidores. Para lograr incidir en las estrategias descritas anteriormente, se ha enfatizado en el desarrollo de germoplasma de maíz que permita implementar líneas de investigación enfocadas a: generar maíces de grano blanco y de grano amarillo con alto contenido de aceite; con calidad nixtamalero-tortillera; con alta calidad de proteína (QPM); pigmentados; palomeros (pop corn); calidad pozolera; calidad para elote; de calidad forrajera; resistentes a fusarium y a la contaminación con Aflatoxinas; entre otras. En el presente manuscrito se presentan los avances y logros obtenidos en estas líneas de investigación. Con base en la información presentada es posible decir que estamos al frente de grandes retos y oportunidades en la investigación interdisciplinaria de maíz en Latinoamérica. Que nos permitirá desarrollar materiales genéticos que además de buscar hacer frente a riegos inminentes de producción, podamos seleccionar maíces diferenciados, bio-fortificados, que aporten mayor valor agregado y que permitan desarrollar componentes bio-activos, alimentos funcionales y desarrollo de nuevos productos.

Palabras clave: Maíces bio-fortificados, alimentos funcionales, componentes bio-activos, valor agregado, mejoramiento genético.

INTRODUCCIÓN

En México la importancia del maíz está determinada por diversos factores como son: alimentario, cultural, social, económico, ecológico, científico, de salud pública, productivo, pecuario, industrial, etc.; el consumo *per cápita* de maíz en México es de 336 kg año⁻¹; la superficie cultivada es de alrededor de 7.5 millones de hectáreas con un rendimiento medio de 3.83 ton ha⁻¹, de las cuales 5.9 millones de hectáreas se siembran bajo condiciones de temporal (secano), con un rendimiento medio de 2.47 ton ha⁻¹ y 1.6 millones de hectáreas bajo riego, con un rendimiento medio de 8.73 ton ha⁻¹, [1]. Los datos anteriores implican una amplia gama de sistemas de producción que van desde la agricultura empresarial, altamente tecnificada, donde se utilizan semillas mejoradas, riego e insumos sin restricción. De manera opuesta, se encuentra la agricultura de



subsistencia, donde se utilizan las semillas nativas, una insipiente aplicación de insumos, así como una errática precipitación pluvial. En México son producidos alrededor de 28 millones de toneladas de maíz, de los cuales casi el 90% es maíz de grano blanco, y el resto de grano amarillo y usos especiales. Sin embargo, la demanda de maíz en México es superior a su producción, por lo que cada año el país importa más de 16 millones de toneladas de maíz de grano amarillo que se utilizan principalmente en las industrias agropecuaria y de transformación [1].

Existen evidencias antropológicas de que la domesticación del maíz se inició en Mesoamérica hace más de 9 000 años [2]; por lo que, a través de los siglos, se ha practicado selección en los maíces nativos hacia características particulares que provienen de los gustos y criterios que cada productor ha tenido en cuanto a forma y tamaño de mazorca, número de hileras, color y tipo de grano, grueso del elote, precocidad y diversos usos apreciados por sus propiedades de calidad culinaria, como una buena nixtamalización, extensibilidad de la masa, dureza o suavidad de la tortilla, aroma, sabor, tiempo de cocción, perfil de aminoácidos y proteínas, entre muchas otras [3]. En la actualidad, esta selección sigue siendo vigente por los productores e investigadores quienes aprovechan los avances tecnológicos que permiten asistir la selección de manera eficiente para identificar maíces con características específicas.

Gracias a la gran diversidad genética de maíz en Latinoamérica y, de manera específica, en México, se tiene la oportunidad de enfocar el mejoramiento genético con la interacción de especialistas en otras disciplinas relacionadas con la tecnología de alimentos para confeccionar maíces bio-fortificados y especializados que aporten mayor valor agregado y que permitan desarrollar componentes bio-activos y alimentos funcionales de acuerdo a las principales formas de consumo, utilización y aprovechamiento a través de una gran variedad de procesos tradicionales como la nixtamalización, fermentación, cocimiento, tostado, entre otros. Asimismo, con la incorporación de procesos tecnológicos modernos dentro de los programas de mejoramiento, para seleccionar maíces que puedan ser utilizados por la industria para la extracción de diversos derivados de maíz como almidones, edulcorantes, fármacos, alcoholes, biopolímeros, combustibles, entre otros; no menos importante también, es la utilización del maíz como base de la alimentación pecuaria, donde a través de la selección se han identificado maíces con mayor digestibilidad que impactan en la alimentación animal y hacen más eficiente la producción pecuaria.

En la actualidad, en diversas instituciones de México se han fortalecido y consolidado grupos de investigación en tecnología de alimentos, que buscan impactar la salud y alimentación de la población mundial, a través de la generación de nuevo conocimiento científico y tecnológico. La interacción interdisciplinaria de los programas de mejoramiento genético de maíz con estos grupos de investigación, puede potenciar este impacto, al generar maíces especializados que contengan compuestos bio-activos, bio-fortificados y nutraceuticos. Los compuestos nutraceuticos presentes en el maíz no son necesariamente nutrientes, que tradicionalmente han sido asociados con diferencias en la dieta, sino compuestos cuyo consumo ayuda a prevenir e inclusive tratar enfermedades crónico degenerativas [4].



El programa de maíz del INIFAP, en la región del Bajío en México, ha implementado diversas estrategias que están enfocadas a incrementar la producción y productividad del maíz, buscar un valor agregado, un impacto favorable en la salud de los consumidores, e incidir en la eficiencia del sector pecuario y agroindustrial. Estas estrategias se enfocan en:

- a. Generar maíces mejorados que incrementen la producción y reduzcan costos de cultivo para incrementar la rentabilidad del cultivo en diversas regiones productoras de maíz en México.
- b. Seleccionar maíces bio-fortificados, bio-activos y funcionales con mayor valor agregado, que beneficien la salud y nutrición de los consumidores, así como un impacto satisfactorio en los sectores pecuario y agroindustrial.
- c. Desarrollar fuentes de germoplasma que contribuyan a reducir riesgos de factores bióticos y abióticos causados por el cambio climático.

Para lograr incidir en las estrategias descritas anteriormente, se ha enfatizado en el desarrollo de germoplasma de maíz que permita implementar las líneas de investigación descritas a continuación:

GENERACIÓN DE MAÍCES CON ALTO CONTENIDO DE ACEITE

El programa de Maíz del INIFAP del Bajío en conjunto con el Programa del Noroeste de México desarrolló cuatro poblaciones de maíz de alto contenido de aceite (dos de grano amarillo y dos de grano blanco), las cuales, a través de 14 ciclos de selección recurrente asistida a través de espectrofotometría de rayos infrarrojos cercanos (NIRS), incrementaron al doble del contenido de aceite de las poblaciones originales [5, 6]. Con el objetivo de iniciar un programa de hibridación, que permitiera el aprovechamiento del germoplasma desarrollado, a partir de las cuatro poblaciones con alto contenido de aceite, fueron derivadas Líneas Doble Haploides (LDH), cuya evaluación *per se* y a través de mestizos [7], así como por cruzamientos dialélicos [8, 9], permitieron identificar LDH agrónomicamente superiores, con mejor respuesta heterótica y con mayor adaptación. Con las combinaciones superiores de dichas líneas, en el año 2018, se liberaron, registraron y se obtuvo el título de obtentor de tres nuevos híbridos de alto contenido de aceite: el H-388 O [10] y el H-389 O [11] de grano blanco y el H-327 AO [12] de grano amarillo, todos ellos adaptados a regiones subtropicales de México y que constituyen una alternativa para impactar en la alimentación humana y pecuaria [13], así como en procesos agroindustriales. De manera paralela se estudió el perfil de ácidos grasos en grano [5, 14], así como las propiedades de los ácidos grasos y características del almidón durante el proceso de nixtamalización y elaboración de tortillas [15]. Por otro lado, con este germoplasma en una botana (*snack*) combinada con frijol, se identificaron compuestos bio-activos (fenólicos y oligosacáridos) con actividad antioxidante que pueden prevenir el cáncer [16]. Actualmente, se sigue generando información enfocada hacia las propiedades funcionales y compuestos fitoquímicos, como tocoferoles y fitoesteroles entre otros.



MAÍCES DE GRANO BLANCO CON CALIDAD NIXTAMALERO-TORTILLERA

En México, el maíz constituye la base de la alimentación de los mexicanos, a través de productos derivados de la nixtamalización como la tortilla y otros platillos tradicionales, en donde los maíces de grano blanco juegan un papel preponderante. Por lo que, los maíces de grano blanco con calidad nixtamalero-tortillera constituyen una de las principales líneas de investigación del Programa de Maíz del INIFAP.

El proceso de nixtamalización se caracteriza por la hidrólisis que sufre el pericarpio del grano, durante el cocimiento alcalino, cuyo efecto, primeramente, en la solubilización del pericarpio por la acción del óxido de calcio, y que junto con el agua se introducen al interior del grano de maíz, iniciándose así el proceso de hinchamiento e hidratación de los gránulos de almidón contenidos en el endospermo del grano [17].

Esta línea de investigación se enfoca en la generación de maíces de alto potencial de rendimiento de grano blanco. Con el apoyo del Laboratorio Nacional de Calidad de Maíz del INIFAP, se busca que los maíces superiores presenten características de calidad, como son rendimiento de masa y tortilla, buenas características texturales y nutricionales, vida de anaquel, etc. [18, 19]. Algunos híbridos de grano blanco que han sido liberados y registrados en el programa de Maíz del INIFAP adaptados a diversos sistemas de producción de regiones subtropicales son: el H-316 y el H-317 [20]. Actualmente, se encuentran en proceso de caracterización morfológica y de calidad, una nueva generación de híbridos experimentales de grano blanco superiores de mayor potencial de rendimiento, que requieren de su evaluación extensiva para poder llegar a liberar y registrar nuevos híbridos de grano blanco adecuados para la industria de la masa y la tortilla en el país.

MAÍCES DE GRANO AMARILLO

Debido a que en México existe una demanda por parte de la industria agropecuaria de maíces de grano amarillo, es necesario recurrir a la importación de más de 16 millones de toneladas anuales [1]. Con el fin de contribuir a reducir las importaciones de grano amarillo en el país, en el Programa de Maíz del INIFAP, se está trabajando en el desarrollo de germoplasma a través del método genealógico, para la formación de híbridos agrónomicamente competitivos con texturas específicas que demandan los diferentes tipos de industrias que van desde cristalinos duros (tipo Flint) a dentados más suaves, y de color de grano más intenso a amarillo claro. En esta línea de investigación también se ha interaccionado con el CIMMYT en un proyecto para la generación de maíces bio-fortificados ricos en pro-vitamina A y beta-carotenos [21]. En el año 2018, el programa de Maíz del INIFAP del Bajío, a partir de nuevas combinaciones de líneas recicladas obtenidas por el método genealógico, liberó y registró el nuevo híbrido H-387A [22], con un rendimiento competitivo, un amplio rango de adaptación, color amarillo intenso, textura semicristalina y un buen contenido de carotenoides totales.



MAÍCES DE ALTA CALIDAD DE PROTEÍNA (QPM)

Como una alternativa para mitigar los problemas de desnutrición que existen en muchas regiones de México, los maíces de alta calidad de proteína (QPM por sus siglas en inglés) por su mayor contenido de lisina y triptófano, pueden contribuir en el mejoramiento de las dietas en los sectores más pobres del país. En esta línea de investigación, se ha generado información del potencial productivo y adaptación de híbridos de maíz QPM a través de diferentes mega-ambientes en México [23]; del potencial productivo, propiedades físicas y valor nutricional en híbridos QPM, [24, 25], del proceso de nixtamalización y propiedades de la tortilla en maíces QPM [26]; entre muchas otras. Recientemente, se ha iniciado el estudio de la capacidad antioxidante de péptidos derivados de maíces QPM como componentes anticancerígenos [27 y 28], así como la elaboración de botanas alimenticias combinando maíz de QPM con frijol tépari [29].

El programa de Maíz del INIFAP del Bajío, en 2018, a través de la utilización de líneas de QPM de segunda generación, liberó y registró el nuevo híbrido H-390 C, con rendimiento competitivo y con amplio rango de adaptación.

Los elotes (green corn) son un vegetal fresco, con gran demanda en el mercado nacional. En la mayoría de los países los elotes consumidos, corresponden a la especie *Zea mays var. Saccharata* conocido como *sweet corn*. En México se consume preferentemente *Zea mays L.* de endospermo normal y deficiente en los aminoácidos esenciales lisina y triptófano, por lo que los elotes de maíces QPM se presentan como una opción más nutritiva, toda vez que se ha demostrado, su buena calidad comercial como son: mayor tamaño del elote y llenado completo de granos, así como su superior calidad composicional y nutricional por su mayor contenido de glucosa, fructosa, sacarosa y triptófano respecto a un testigo comercial. Además de identificar la mejor fecha de cosecha, se encontró que los elotes almacenados hasta por 20 días a 4°C, mantuvieron su alto contenido de triptófano, así como los atributos sensoriales que se demandan en el mercado [30]. Por lo que los elotes de maíces QPM, constituyen una buena alternativa para mejorar la nutrición de los sectores más desprotegidos.

MAÍCES PIGMENTADOS

Los maíces pigmentados han sido utilizados desde tiempos ancestrales en la elaboración de alimentos tradicionales, así como en actividades ceremoniales en diversas culturas mesoamericanas [4]. Las antocianinas y compuestos fenólicos, que determinan el color (azul o rojo) del grano de maíz, inciden en la actividad antioxidante que contrarresta a los radicales libres responsables de causar la oxidación de membranas y daño al ADN desencadenando el cáncer, problemas cardiovasculares, fibrosis y envejecimiento [4].

El Programa de Maíz del INIFAP en el Bajío, inició una línea de investigación enfocada al desarrollo y generación de híbridos de maíz pigmentado con mayor potencial de rendimiento, y mejores características agronómicas, debido a que las variedades pigmentadas utilizados actualmente por los productores, son maíces nativos o criollos,



los cuales en su mayoría, presentan desventajas agronómicas, como son: bajo potencial de rendimiento; excesiva altura de planta y tallos débiles, que los hace susceptibles al acame; baja respuesta a la utilización de insumos, que limita la posibilidad de obtener mayores rendimientos mediante un manejo agronómico intensivo en regiones de alto potencial productivo.

En esta línea de investigación, se ha desarrollado un conjunto de líneas endogámicas de maíz pigmentado con las que fueron formados una serie de híbridos de ciclo intermedio-precoc con grano de color negro o rojo, con alto potencial de rendimiento para ser utilizados como una alternativa de valor agregado para la producción de maíz en regiones subtropicales, algunos de estos híbridos se les determinó su perfil fitoquímico y nutracéutico [31]. Actualmente, se está conjuntando la información necesaria para liberar, registrar y obtener el título de obtentor de dos nuevos híbridos trilineales, de maíz pigmentado de color de grano azul y granate, adaptados a regiones subtropicales.

Por otro lado, se está trabajando con híbridos no convencionales (HNC), los cuales se definen como híbridos que por lo menos uno de sus progenitores no es una línea endogámica [32]. En este caso los HNC son la cruce de material nativo con la línea endogámica, que permite incrementar el rendimiento y mejorar las características agronómicas de las cruces, conservando la calidad de la variedad nativa, que en este caso se busca conservar la calidad para pozole de la raza elotes occidentales. Actualmente, se está conjuntando la información necesaria para liberar, registrar y obtener el título de obtentor de un HNC de maíz pozolero de grano rojo.

MAÍCES PALOMEROS O REVENTADORES (POP CORN)

Las razas más antiguas de maíz clasificadas como indígenas antiguas [33], presentan características de maíces reventadores o palomeros, no obstante, los maíces nativos representativos de estas razas son ancestros de los maíces palomeros comerciales actuales, tienen un volumen de expansión muy por debajo de los maíces comerciales introducidos de otras latitudes que han tenido un proceso de selección más intensivo hacia un mayor volumen de expansión. Por lo anterior, la mayor parte del maíz palomero consumido en México es importado.

Por lo tanto, la investigación está enfocada, por un lado, a reducir las importaciones, y por otro, a que los maíces palomeros constituyan una oportunidad para que los productores maiceros de México puedan incrementar sus ingresos por su valor agregado. El programa de Maíz del INIFAP del Bajío cuenta con germoplasma adaptado de maíces palomeros, con los que se pretende generar maíces híbridos con buen potencial de rendimiento y buenas características agronómicas. Con el apoyo del Laboratorio de Calidad de Maíz del INIFAP se está trabajando en la caracterización física y química tanto de los granos (dureza y tamaño; proteína, almidón y aceite); así como de las palomitas (volumen de expansión y tipo de roseta; azúcares, proteína y fibra dietética). Actualmente, se está conjuntando la información necesaria para liberar, registrar y obtener título de obtentor de un nuevo híbrido trilineal de maíz palomero, adaptado a las regiones subtropicales.



MAÍCES DE CALIDAD FORRAJERA

Cada día el maíz con calidad forrajera constituye una alternativa para la producción de carne, leche y todos sus derivados, contribuyendo a una producción pecuaria más eficiente, e incluso más sustentable ya que el maíz forrajero requiere una menor cantidad de riego que la alfalfa. Algunas características que determinan la calidad forrajera del maíz son: alto rendimiento de materia seca, (más de 19 ton ha⁻¹); alto porcentaje de mazorca (más de 45 %); alta digestibilidad (mayor de 73 %); baja concentración de fibra detergente neutra (menos de 55%); fibra detergente acida (de 28 a 32%); y alta concentración de energía neta de lactancia (más de 1.4 Mcal/kg) [34]. Entre los parámetros de calidad de un maíz forrajero se destacan: la calidad de tallo y hojas, el contenido de fibras y proteína, así como la digestibilidad; atributos que se incorporan en los híbridos forrajeros que se liberan del programa de Maíz del INIFAP [35]. Tal es el caso de dos poblaciones de maíz integradas con germoplasma que fue identificado con características forrajeras en proyectos anteriores. De estas dos poblaciones forrajeras, fueron derivadas Líneas Doble Haploides (LDH), las cuales con la metodología desarrollada por Silva-Venancio y otros [7], se evaluarán las líneas *per se*, los cruzamientos de prueba, y las nuevas combinaciones entre las LDH que resultaron agrónomicamente superiores y con mejor respuesta heterótica que permitan la identificación de nuevos híbridos de alto potencial de rendimiento y calidad forrajera.

MAÍCES RESISTENTES A FUSARIUM Y A LA CONTAMINACIÓN CON AFLATOXINAS

Actualmente, a nivel mundial se ha observado un incremento de los riesgos de producción del maíz (*Zea mays L.*) causados por el cambio climático y su inestabilidad, que implica temperaturas extremas, precipitación errática, humedad relativa, radiación solar, velocidad del viento, entre otros. Estos factores alteran la cantidad, reproducción, diseminación, ciclos biológicos y sobrevivencia de las poblaciones de plagas, cuya alta incidencia afecta severamente la producción del cultivo. También se han incrementado problemas patológicos causados por enfermedades fungosas principalmente *Fusarium* y *Aspergillus* que se manifiestan a través de pudriciones de mazorca y tallo, que afectan el cultivo, y el grano de maíz tanto en el campo como en almacenamiento. Además del impacto en la producción y calidad del grano, estas enfermedades causadas por hongos producen sustancias conocidas como micotoxinas. El incremento de la presencia de *Fusarium* y *A. Flavus* en el cultivo de maíz, tendrá un impacto en la producción y calidad de grano, poniendo en riesgo la salud de los consumidores por su exposición a las micotoxinas. Con base en lo anterior, a través del mejoramiento genético, se pretende desarrollar materiales genéticos de maíz resistentes a *Fusarium* y *A. Flavus* para disminuir la contaminación y diseminación de micotoxinas.

De manera específica la presencia de *Fusarium* se ha incrementado en diversas regiones productoras de maíz en México, con repercusiones considerables en la producción, y con riesgos importantes en la salud a través de las fumonisinas. En el programa de Maíz del INIFAP en el Bajío, se desarrollaron dos poblaciones de maíz, formadas a partir de germoplasma identificado con características resistentes a fusarium, a partir de información obtenida en evaluaciones previas donde se



identificaron materiales que presentaban resistencia a la presencia de *Fusarium* en el tallo. De estas dos poblaciones resistentes, fueron derivadas Líneas Doble Haploides (LDH), las cuales con la metodología desarrollada por Silva-Venancio y otros [7], evaluarán las líneas, los cruzamientos de prueba, y las nuevas combinaciones entre las LDH que resultaron agrónomicamente superiores y con mejor respuesta heterótica, que permitan la identificación de nuevos híbridos con resistencia a *Fusarium* y con alto potencial de rendimiento.

En el caso de *A. flavus*, además de la presencia de mazorcas podridas, este hongo produce compuestos altamente carcinogénicos llamados Aflatoxinas (AF) que constituye un problema muy crítico para la salud humana y pecuaria. Asimismo, causa pérdidas de cosecha importantes ya que el grano contaminado tiene que ser destruido [36, 37]. A lo largo de 15 años de investigación interdisciplinaria, se identificaron materiales que después de su inoculación en laboratorio, presentaron resistencia y susceptibilidad a la contaminación con AF. Sin embargo, dado que los maíces con resistencia a AF, presentaban un mal desempeño agrónomico y bajo rendimiento, se inició un proceso de cruzamientos de los materiales resistentes por líneas élite del Programa de Maíz del INIFAP, buscando, a través del método genealógico, generar nuevas líneas resistentes y altamente productivas. Este grupo de líneas recicladas serán la base para la generación de híbridos resistentes a la contaminación por aflatoxinas [38]. Con este germoplasma desarrollado por el Programa de Maíz del INIFAP en el Bajío, está en proceso la formación y evaluación de nuevos híbridos de alto potencial de rendimiento y que presenten resistencia a la contaminación por aflatoxinas.

CONCLUSIONES

Con base en las líneas de investigación presentadas, donde se describen las fuentes de germoplasma generadas, así como algunos desarrollos tecnológicos obtenidos a la fecha, es posible decir que estamos al frente de grandes oportunidades y retos en la investigación con carácter interdisciplinario del cultivo maíz en Latinoamérica. Mismas que conduzcan a innovar el desarrollo y utilización de materiales genéticos, con los que se podrá, por un lado, seleccionar maíces diferenciados, bio-fortificados, que aporten mayor valor agregado y que permitan desarrollar componentes bio-activos y alimentos funcionales, y por el otro, hacer frente a riesgos inminentes de producción. Desafortunadamente, aunque se cuenta con el material genético y la capacidad científica, en la actualidad escasean las fuentes financieras que respalden la continuidad de estos proyectos.

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 a la Red Latinoamericana del Maíz por gestionar la elaboración y publicación de este artículo.



CONFLICTO DE INTERÉS

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

CONTRIBUCIÓN 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, elaboró el manuscrito y asistió en la selección en laboratorio del material genético descrito en el documento.



REFERENCIAS

- [1] Panorama Agropecuario (2020). SIAP-SADER. Recuperado de: <https://www.inforural.com.mx/wp-content/uploads/2020/11/Atlas-Agroalimentario-2020.pdf>
- [2] Staller, J. E., Tykot, R. H. y Benz F., B. (2006). *Histories of Maize: multidisciplinary approaches to the Prehistory, linguistics, biogeography, domestication, and evolution of maize*. Academic Press.
- [3] Muñoz O. A., A. Santacruz V., P. A. López, H. López S., A. Gil M., J. Legaria S., J. D. Guerrero R., H. Hernández S, E Ortiz T, J I Olvera H, J Romero P, N Gómez M, G Pérez G, A. Mejía C. y R. Gabino G. (2003). Diversidad de ambientes de tipos de mazorca y de otros atributos a nivel de nicho. En Muñoz O. A. Ed. Centli Maíz. Colegio de Posgraduados, Texcoco, Mex. pp 132-143.
- [4] Serna S. S. O., García L. y Gutiérrez U. (2011). Perfil fitoquímico y propiedades nutraceuticas de maíces pigmentados y sus tortillas. En: Preciado-Ortiz R. E. y S. Montes H. (Eds.) Amplitud, mejoramiento, usos y riesgos de la diversidad genética de maíz en México. Sociedad Mexicana de Fitogenética A.C. pp. 75-95.
- [5] Preciado-Ortiz, R. E., S. García-Lara, S., Ortiz-Islas, A., Ortega-Corona y S. O. Serna-Saldivar (2013) Response of recurrent selection on yield, kernel oil content and fatty acid composition of subtropical maize populations. *Field Crops Research* 142:27-35. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.11.019>
- [6] Ortega-Corona A., Picón-Rico, R., Preciado-Ortiz, R. E., Terrón-Ibarra, A. D., Guerrero-Herrera, M. J., García-Lara. S. y Serna-Saldivar, S. O. (2015). Selection response for oil content and agronomic performance in four subtropical maize populations. *Maydica* 60:1-8. Available at: <https://journals-crea.4science.it/index.php/maydica/article/view/1279>
- [7] Silva-Venancio, S., Preciado-Ortiz, R.E., Covarrubias-Prieto, J., Ortiz-Islas, S., Serna-Saldivar, S.O., García-Lara, S., Terrón-Ibarra, A.D. y Palacios Rojas, N. (2019). Identification of superior doubled haploid maize (*Zea mays*) inbred lines derived from high oil content subtropical populations. *Maydica* 64 M7- 1-11, 2019. Available at: <https://journals-crea.4science.it/index.php/maydica/article/view/1879>
- [8] Picón-Rico R., Preciado-Ortiz, R. E., Cervantes-Ortiz, F., Covarrubias-Prieto, J. y Terrón-Ibarra, A. (2018). Efectos heteróticos en líneas doble haploides de maíz de grano blanco y alto contenido de aceite. *Revista Fitotecnia Mexicana* 41(2):177-186. <https://doi.org/10.35196/rfm.2018.2.177-186>.
- [9] Picón-Rico R., Preciado-Ortiz, R. E., Cervantes-Ortiz, F., Covarrubias-Prieto, J. y Terrón-Ibarra, A. (2018). Efectos genéticos en líneas doble haploides de maíz de grano amarillo y alto contenido de aceite. *Revista Fitotecnia Mexicana* 41(3):301-310. <https://doi.org/10.35196/rfm.2018.3.301-310>.
- [10] Preciado-Ortiz R. E., Terrón-Ibarra, A. D., Vázquez-Carrillo, Ma. G., Gómez-Montiel, N. O, Briones-Reyes, D. y Peña-Ramos, A. (2019). H-388 O, Híbrido trilineal de maíz de grano blanco oleoso para el subtrópico de México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 42(3):309-311. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802019000300309&lng=es&nrm=iso
- [11] Preciado-Ortiz R. E., Terrón-Ibarra, A. D., Vázquez-Carrillo, Ma. G., Gómez-Montiel, N. O, Briones-Reyes, D. y Peña-Ramos, A. (2019). H-389 O, Híbrido trilineal de maíz de grano blanco oleoso adaptado a regiones subtropicales de México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 42(2):183-185. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802019000200183&lng=es&nrm=iso
- [12] Preciado-Ortiz R. E., Terrón-Ibarra, A. D., Vázquez-Carrillo, Ma. G., Gómez-Montiel, N. O y Briones-Reyes, D. (2019). H-327 AO, Híbrido trilineal de maíz oleoso de grano amarillo para regiones subtropicales de México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 42(3):313-315. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802019000300313&lng=es&nrm=iso
- [13] Vázquez-Carrillo, M. G., R. E. Preciado-Ortiz, D. Santiago-Ramos, N. Palacios-Rojas, A. Terrón-Ibarra y A. Hernández-Calette (2018). Estabilidad del rendimiento y calidad de grano y tortilla de nuevos híbridos de maíz con valor agregado para el subtrópico de México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 41(4-A):509-518. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802018000500509&lng=es&nrm=iso
- [14] Ortiz-Islas, S., García-Lara, S., Preciado-Ortiz, R. E. y 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* 1-11. doi: <https://doi.org/10.1002/cche.10109>



- [15] Preciado-Ortiz, R. E., Vázquez-Carrillo, Ma. G., Figueroa-Cárdenas, J. D., Guzmán-Maldonado, S. H., Santiago-Ramos, D. y 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. doi: <http://doi.org/10.1016/j.jcs.2018.08.015>
- [16] Luzardo-Ocampo, I., Campos-Vega, R., Gaytán-Martínez, M., Preciado-Ortiz, R. E., Mendoza, S. y 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(2017):304-311. doi: <http://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.07.018>
- [17] Arámbula, V. G., Barrón, A. L., González, H. J., Moreno, M. E. y Luna, B., G. (2001). Efecto del tiempo de cocimiento y reposo del grano de maíz (*Zea mays* L.) nixtamalizado, sobre las características fisicoquímicas, reológicas, estructurales del grano, masa y tortillas de maíz. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición* 51:187-194. Disponible en: http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0004-06222001000200011&lng=es&nrm=iso. ISSN 0004-0622.
- [18] Vázquez-Carrillo M. G., Santiago-Ramos, D., Gaytan-Martinez, M., Morales-Sánchez, E. y Guerrero-Herrera, M. J. (2015). High oil content maize: Physical, thermal and rheological properties of grain, masa, and tortillas. *LWT-Food Science and Technology* 60(1):156-161. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.07.043>
- [19] Ordaz-Ortiz, J. J. y Vázquez-Carrillo, M. G. (1997). Vida de anaquel y evaluación sensorial en tortillas de maíz elaboradas con conservadores y mejoradores. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición* 47(4):372-376. Disponible en: <https://www.alanrevista.org/ediciones/1997/4/art-13/>
- [20] Preciado O., R. E. y Terrón Ibarra, A. D. (2001). Comportamiento y adaptación de dos nuevos híbridos trilineales de maíz, H-316 y H-317, para El Bajío. *Revista Fitotecnica Mexicana* 24(2):235-239. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61024214>
- [21] Pixley K, Palacios-Rojas, N., Babu, R., Mutale, R., Surlis, R. y Sempungwe, E. (2013). Bio-fortification of maize with pro-vitamin A carotenoids in: Carotenoids in Human Health. Ed. S. A. *Tanumihardo (New York: Springer Science + Business Media)*, 271-292. doi: <http://doi.org/10.1007/978-1-62703-2013-2-17>
- [22] Preciado-Ortiz R. E., Terrón-Ibarra, A. D., Vázquez-Carrillo, Ma. G. y Gómez-Montiel, N. O. (2019). H 387 A, Híbrido trilineal de maíz de grano amarillo adaptado a regiones subtropicales de México. *Revista Fitotecnica Mexicana* 42(1):67-69. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802019000100067&lng=es&nrm=iso
- [23] Preciado-Ortiz R., Guerrero, R., Ortega, A., Terrón, A., Crossa, F., Cordova, H., Reyes, C., Aguilar, G., Tut, C., Gómez, N. y Cervantes, E. (2006). Identification of superior quality protein maize hybrids for different mega-environments using the biplot methodology. *Maydica* 51:451-460. Disponible en: <https://repository.cimmyt.org/handle/10883/3038?locale=attribute=en>
- [24] Melesio C., J. L., Preciado-Ortiz, R. E., Terrón I., A. D., Vázquez C., Ma. G., Herrera M., P., Amaya G., C. A. y Serna S., S. O. (2008). Potencial productivo, propiedades físicas y valor nutrimental de híbridos de maíz de alta calidad proteínica. *Agricultura Técnica en México* 34 (2):225-233. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0568-25172008000200009&lng=es&nrm=iso
- [25] Serna-Saldívar S.O, Amaya, C. A., Herrera M., G. P., Melesio C., J. L., Preciado-Ortiz, R. E., Terrón I., A. D. y Vázquez-Carrillo, G. (2008). Evaluation of the lime-cooking and tortilla making properties of quality protein maize hybrids grown in Mexico. *Plant Foods Hum Nutr* 63:119-125. doi: <https://doi.org/10.1007/s11130-008-0080-1>
- [26] Vázquez-Carrillo M. G., Mejía-Andrade, H., Tut-Couoch, C. y Gómez-Montiel, N. (2012). Características de granos y tortillas de maíces de alta calidad proteínica desarrollados para los Valles Altos centrales de México. *Revista Fitotecnica Mexicana* 35 (1):23-31. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802012000100005&lng=es&nrm=iso
- [27] Ortiz-Martínez, M., E. González de Mejía, S. García-Lara, O., Aguilar, L. M. López-Castillo, & J. T. Otero-Pappatheodorou (2017) Antiproliferative effect of peptide fractions isolated from a quality protein maize, a white hybrid maize, and their derived peptides on hepatocarcinoma human HepG2 Cells. *J. Funct. Foods* 34, 36-48. doi: <http://doi.org/10.1016/j.jfprot.2014.03.044>
- [28] Díaz-Gómez J.L., F. Castorena-Torres., R.E. Preciado-Ortiz, & S. García-Lara (2017) Anti-Cancer Activity of Maize Bioactive Peptides. *Front. Chem.* 5:44. doi: <http://doi.org/10.3389/fchem.2017.00044>



- [29] Gómez-Favela, M. A., Reyes-Moreno, C., Milán-Carrillo, J., Partida-Preciado, R. A., Espinoza-Moreno, R. J., Preciado-Ortiz, R. y Gutiérrez-Dorado, R. (2021). Gluten-free healthy snack with high nutritional and nutraceutical value elaborated from a mixture of extruded underutilized grains (quality protein maize/tepyary bean). *Acta Universitaria* 31, e3024. doi: <http://doi.org/10.15174.au.2021.3024>
- [30] Marrufo-Díaz M. L., Vázquez-Carrillo, M. G., Santiago-Ramos, D., Ybarra-Moncada, M. C. y Mejía-Andrade, H. (2021). Physicochemical and sensory properties of 'corn on the cob' (elotes) from quality protein maize (QPM) hybrids as influenced by harvest stage and cold storage time. *Journal of Cereal Science* 102. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2021.103348>
- [31] Urias-Peraldi, M., Gutiérrez-Urbe, J. A., Preciado-Ortiz, R. E., Cruz-Morales, A. S., Serna-Saldivar, S. O. y García-Lara, S. (2013). Nutraceutical profiles of improved blue maize (*Zea mays*) hybrids for subtropical regions. *Field Crops Research* 141 (2013) 69-76. doi: <http://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.11.008>
- [32] Paliwal, R.L. (1986). CIMMYT's expanded maize improvement program. In: Proceedings of the Second Asian Regional Maize Workshop. Wedderburn, R. N., and C. De León, (eds.). CIMMYT. pp. 125-140.
- [33] Wellhausen, E. J., Roberts, L. M., Hernández X., E. y Mangesdorf, P. C. (1951). Razas de Maíz en México: Su Origen, Características y Distribución. Folleto Técnico No. 5. Secretaría de Agricultura y Ganadería, Oficina de Estudios Especiales. p. 237. Disponible en: https://www.ars.usda.gov/ARUserFiles/50301000/Races_of_Maize/Raza_Mexico_0_Book.pdf
- [34] Núñez, H.G., Peña R., González C., F. y Faz C., R. (2006). Características de híbridos de maíz de alta calidad nutricional. In: Maíz forrajero de alto rendimiento y calidad nutricional. Núñez H., G. (comp) Libro científico Num. 13 INIFAP-CIRNOC-CELALA pp. 45-97.
- [35] Peña R. A., González C., F., Núñez H., G., Tovar G., Ma. R., Preciado O., R. E., Terrón I., A., Gómez M., N. y Ortega C., A. (2006). Estabilidad del rendimiento y calidad forrajera de híbridos de maíz. *Revista Fitotecnia Mexicana* 29 (Num. Esp. 2): 109-114. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61009819>
- [36] Arrúa A., Moreno, E., Quezada, M., Moreno, J. y Vázquez, A. (2012). Aflatoxygenic aspergillus: Current taxonomic approach. *Mexican Journal of Agricultural Sciences* 3:1047-1052. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342012000500016&lng=es&nrm=iso
- [37] Martínez, P. H., Hernández, D. S., Reyes M., C. y Vázquez, C. (2013). El Género *Aspergillus* y sus Micotoxinas en Maíz en México: Problemática y Perspectivas. *Revista Mexicana de Fitopatología* 31 (2):126-146. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-33092013000200005&lng=es&nrm=iso
- [38] Sánchez-Isordia N.D, Preciado-Ortiz, R. E., Covarrubias-Prieto, J., Terrón, A. D., Reyes, C. A., Gómez, N. O., García, M. A., Ramírez, J. G. y Moreno-Martínez, E. (2020) Yield Potential and Aflatoxin Resistance in Subtropical Maize Hybrids. *Environmental Analysis & Ecology Studies* 7(1):682-705. doi: <http://doi.org/10.31031/EAES.2020.07.000654>

La producción de maíz en Argentina

Daniel A. Presello^{1*}, Fernando J. Giménez² y Facundo J. Ferraguti³

¹Estación Experimental Agropecuaria Pergamino. Av. Frondizi km 4,5. 2700 - Pergamino. Provincia de Buenos Aires. Argentina.

²Estación Experimental Agropecuaria Bordenave. Ruta Provincial 76, km 36,5. 8187 - Bordenave, Provincia de Buenos Aires. Argentina.

³Estación Experimental Agropecuaria Oliveros. Ruta Nacional 11 km 353. 2206 - Oliveros. Provincia de Santa Fe. Argentina.

*Autor para correspondencia/Corresponding author: presello.daniel@inta.gob.ar

Maize production in Argentina

Resumen

El maíz (*Zea mays* L.) es uno de los cultivos más relevantes en Argentina. La mayor parte de la producción de grano se exporta y aproximadamente un tercio de la misma se usa internamente como forraje o es destinado a las industrias de molienda y producción de etanol. El área de siembra ha aumentado en forma sostenida durante los últimos diez años llegando a una superficie de 7,4 millones de hectáreas entre 2020 y 2021, con una producción de 60,5 millones de toneladas de grano. La producción de maíz podría ser intensificada, de manera sostenible, abordando algunas de las mayores limitantes, como son la nutrición del cultivo, la calidad de siembra para lograr un canopeo eficiente, las deficiencias en protección del cultivo, una correcta elección del cultivar, el ajuste del momento y tecnología de cosecha, y la mejora de las instalaciones para transporte y almacenamiento, entre otras. Nuevas políticas de Estado y un mayor fortalecimiento de las redes de investigación y desarrollo serán necesarias para aumentar la producción de manera sustentable y con menores niveles de contaminación.

Palabras clave: Maíz, Rendimiento en Grano, Limitantes del Rendimiento, Producción Sustentable, Argentina.

Abstract

Maize (*Zea mays* L.) is one of the most relevant crops in Argentina. Most of grain production is exported and about one third of the grain is used domestically as forage or destined to the industries of milling and ethanol production. The area cultivated with maize has consistently increased in the last ten years reaching a sowing area of 7,4 million hectares between 2020 and 2021, with a grain production of 60,5 million tons. Sustainable grain production might be intensified by tackling major yield constrains such as, crop nutrition, planting quality to achieve an efficient canopy, deficiencies in crop protection, cultivar choice, harvest time and harvest technology, and deficiencies in grain transportation and storage, among others. New government politics and better consolidation of the research and development networks are needed to achieve higher sustainable production with lower contamination levels.

Keywords: Maize, Grain Yield, Yield Constrains, Sustainable Production, Argentina



Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /
Edited by:
Gabriela Albán

Recibido /
Received:
24/01/2022

Aceptado /
Accepted:
28/2/2022

Publicado en línea /
Published online:
16/05/2022

SITUACIÓN ACTUAL DEL CULTIVO DE MAÍZ EN ARGENTINA

El maíz (*Zea mays* L.) es una de las especies cultivadas más relevantes en Argentina. El cultivo se lleva a cabo en diferentes regiones agroecológicas (Fig. 1), con un gradiente de precipitaciones descendientes hacia el oeste y dos mega ambientes diferenciados por su latitud, al norte del Paralelo 30 Sur predominan los ambientes de tipo subtropical mientras que, al sur del mismo, el ambiente es similar al de otras regiones templadas del mundo. Estas variaciones son importantes ya que determinan el tipo de cultivo a sembrar y las tecnologías de manejo apropiadas.

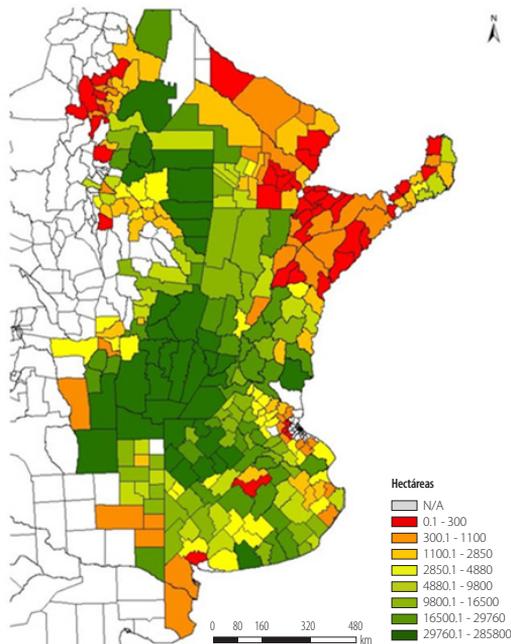


Figura 1. Importancia regional del cultivo de maíz en Argentina [1].

Dentro de la región maicera coexisten diversos tipos de productores. La mayor parte de la producción es realizada por agricultores altamente capitalizados, con campo propio o arrendado, que incluyen el maíz en las rotaciones y demandan tecnologías modernas que faciliten el manejo en superficies extensas. Un segundo segmento de agricultores, menos capitalizados, que aún producen en campo propio con intención de incrementar la participación del maíz en la rotación de cultivos para mejorar la estructura del suelo y diversificar la producción estival, pero con dificultad para financiar insumos claves como semilla, fertilizantes y fitosanitarios. Los pequeños agricultores familiares y de subsistencia con escaso capital y recursos financieros son relevantes por el número más que por la superficie ocupada y demandan tecnología del Estado para conseguir producir.

Como alternativa al maíz para producir grano como mercancía a valor de mercado, se destacan los maíces con calidad diferenciada como los tipos flint (*Z. mays*, var.



indurata) y pisingallo o pop corn (*Z. mays* var. *Everta*), que tienen sobreprecios variables dependiendo del año. La producción es destinada casi en su totalidad a la exportación, ubicando a la Argentina como el principal oferente a nivel mundial de estos maíces [2].

La superficie sembrada y la producción del cultivo de maíz en Argentina fueron aumentando considerablemente en la última década (Fig. 2). El área sembrada incrementó de 5,0 a 9,7 Mha, mientras que la producción lo hizo de 21,5 a 60,5 M t. Existe una diferencia anual de aproximadamente 1,5 M ha entre superficie sembrada y cosechada, que se debe mayormente a que parte de la superficie se procesa como silaje para alimentación de ganado bovino (Fig. 2). El aumento de la superficie del cultivo de maíz se registró tanto en las áreas tradicionales del cultivo, como en nuevas regiones y en cultivos de siembra tardía o segunda siembra sobre cultivos invernales, sustituyendo a otros cultivos principalmente la soja [3].

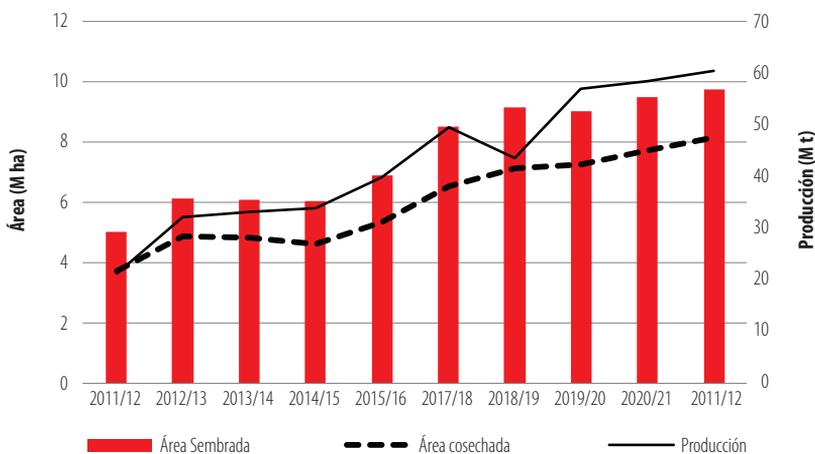


Figura 2. Evolución del área sembrada, cosechada y producción en Argentina durante la última década [3].

Los aumentos en el área sembrada fueron acompañados con incrementos en el rendimiento por hectárea. Considerando los últimos diez años presentados (Fig. 2), el rendimiento en grano promedio del primer quinquenio fue de 6,78 t/ha mientras que en el segundo fue 7,30 t/ha, lo que representa un incremento de 7,6 % [3]. El rendimiento por hectárea presenta importantes variaciones debido a las características edafoclimáticas de las regiones donde se cultiva maíz (Fig. 1) y a variaciones anuales en el régimen de precipitaciones.

El principal destino de la producción del grano es la exportación, que en el año 2020 fue superior a 33 M t de granos con un valor que superó los 6 000 millones de dólares. El segundo destino más importante es el uso forrajero (Fig. 3), que fue de 12,4 M t, de las cuales el 36 % se destina a la producción avícola, el 35 % para la producción de carne vacuna, el 17 % como insumo para preparación de alimentos balanceados en tambos y el 12 % en la producción de ganado porcino. La industria utiliza 3,8 M t de los cuales 1,7 M t se utilizan para producir etanol y 2,1 M t en la molienda húmeda, que produce



almidón o maicena, aceite y jarabe de maíz, entre otros productos y la molienda seca, que produce copos de maíz, sémolas y harina, entre otros productos [4].

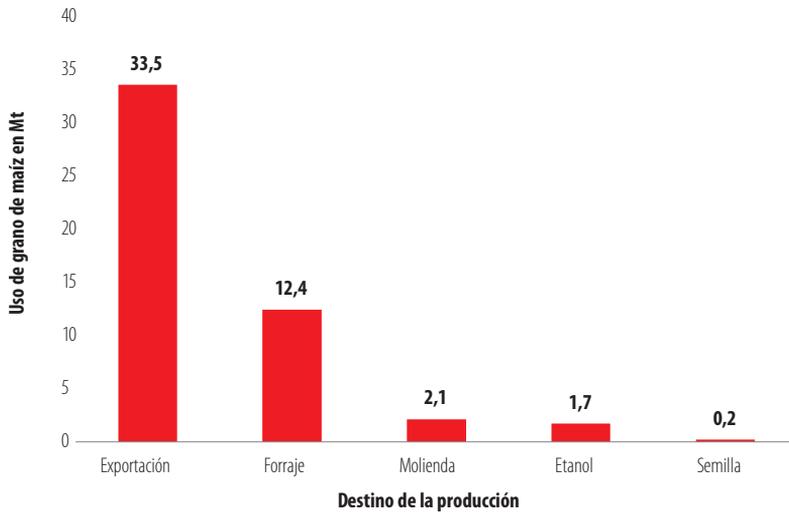


Figura 3. Principales destinos de la producción de maíz en Argentina durante la campaña de cultivo 2019/2020 [4].

Argentina tiene un amplio margen para transformar la producción de maíz, ya que la industria consume menos del 35 % de la producción mientras que, en otros países, como Brasil y Estados Unidos, la industria utiliza más del doble de esta proporción. La industria de biomateriales es una de las de mayor proyección de crecimiento en el mundo y en la cual la principal materia prima es el grano de maíz. Esta tendencia esperada se verifica para las industrias de molienda que han mostrado un crecimiento sostenido en el uso de grano de maíz durante los últimos años [5].

La mayor parte del maíz en Argentina se cultiva en seco. Si bien existe un pequeño porcentaje de la superficie sembrada bajo diferentes sistemas de riego, principalmente por aspersión, estos son mayormente destinados a la producción de semilla. En estas condiciones prevalentes de seco, para aumentar la producción en los cultivos de maíz se deberían enfocar los esfuerzos en la intensificación sustentable de los agroecosistemas y en la reducción de las brechas productivas entre los rendimientos máximos alcanzables con las limitaciones esperadas debido a la variación en las precipitaciones.

En la actualidad existe una marcada demanda de una agricultura de bajo impacto ambiental. La mejor caracterización del ambiente y de la genética a utilizar, junto con el conocimiento de la biología de organismos perjudiciales, incluyendo plagas, malezas y enfermedades, permitirán desarrollar estrategias de manejo integrado más eficientes y menos dependientes de productos fitosanitarios. Esto permitirá aumentar los rendimientos de manera sustentable en el tiempo con menores efectos negativos en el ambiente.



El maíz es un cultivo muy exigente en cuanto a los factores que determinan la producción de grano. Esta sensibilidad a la oferta de recursos, especialmente en el periodo crítico de la definición del rendimiento, determina una considerable brecha entre el rendimiento que se puede obtener en condiciones de secano y el que es obtenido en promedio por los productores. Esta brecha es aún más evidente en zonas fuera de la Llanura Pampeana. El Programa de Cereales y Oleaginosas del INTA tiene entre sus objetivos el aumento de la producción nacional del cultivo de maíz. Mediante la creación de un marco que permita un mayor nivel de adopción de las tecnologías disponibles y mayor investigación y desarrollo de nuevas tecnologías, se considera que es factible aumentar el rendimiento nacional a 8 760 kg/ha, un 20 % más que el promedio del último quinquenio. La producción de granos aumentaría en 14,5 M t, de los cuales 10,6 M t se destinarían a la exportación, 3,7 M t a la alimentación animal y 0,5 M t a la industria [6].

POSIBILIDADES DE INCREMENTO DE LA PRODUCCIÓN DE GRANO

Entre los principales factores a mejorar para incrementar la producción de grano de maíz se incluye la nutrición del cultivo, la fecha de siembra, el arreglo espacial, la protección del cultivo, la elección del cultivar, el ajuste del momento y la tecnología de cosecha, el transporte y el manejo post cosecha.

Nutrición del cultivo

Aumentar el rendimiento del cultivo de maíz sin comprometer críticamente la fertilidad edáfica, implica un aumento importante en el uso de fertilizantes. Esto requiere el desarrollo adecuado de tecnologías de aplicación y de estrategias de fertilización en un contexto de rotaciones de cultivo, para no generar un impacto ambiental por el aumento de la dosis de fertilizante. A continuación, se describe la problemática y manejo de la fertilidad en Argentina, compendiada a partir de informes de expertos [7-12].

El nitrógeno es el nutriente con mayor impacto en la producción de maíz. La falta de oferta de este nutriente, aún por períodos cortos, se traduce en una caída de la capacidad fotosintética del follaje y la disminución de la tasa de crecimiento del cultivo, por ende, caída en el rendimiento. En Argentina los niveles de aplicación de nitrógeno son bajos en comparación al de los que se utilizan en países más desarrollados. Con la premisa de aumentar los rendimientos, la fertilización nitrogenada debe lograr una provisión constante y en un nivel adecuado, que se relacione con la demanda del cultivo. Existe abundante información sobre fuentes de nitrógeno, momento y forma de aplicación, pero es necesario continuar con las líneas de investigación centradas en minimizar las pérdidas de nitrógeno por volatilización, que no solo disminuyen la oferta del nutriente para el cultivo, sino que a su vez producen emisiones de óxido nitroso, que es un gas de efecto invernadero. La fijación biológica de nitrógeno, mediante la incorporación de leguminosas a las rotaciones es una estrategia económica y sustentable, al igual que la utilización de fertilizantes orgánicos.

La extensión y difusión de estos trabajos es de vital importancia para que las prácticas de manejo de nitrógeno con bases científicas sean adoptadas por un porcentaje mayor de productores. La evidencia actual indica que es posible manejar los cultivos con una alta eficiencia de uso del nitrógeno aplicado, pero para ello los asesores y productores deben



identificar correctamente las limitaciones y potencialidades del ambiente productivo y actuar en consecuencia [7-9, 11,12].

Por otra parte, el fósforo es un elemento crítico en la fertilización, dada su importancia como macronutriente y por el hecho de que Argentina no produce fertilizantes fosforados y depende de la importación para satisfacer la demanda. Un aspecto positivo es su baja movilidad en el suelo, por lo que el desafío principal está en el acceso a los fertilizantes en cantidad y calidad, para lograr niveles de reposición y reconstrucción de la provisión de este elemento. La dosis promedio a nivel nacional es de 12 kg/ha de P_2O_5 . En la mayoría de las regiones los niveles de este nutriente en el suelo, han bajado en las últimas décadas como consecuencia de la intensificación del uso agrícola y la insuficiente reposición del nutriente. El régimen de tenencia de la tierra, mayormente bajo contratos de arrendamiento, y la previsibilidad de continuar con la explotación de un lote, también son factores que influyen negativamente en la implementación de estrategias a mediano y largo plazo para aumentar sostenidamente los niveles de este nutriente. El uso de biofertilizantes y bioestimulantes mejora la eficiencia de captación de este nutriente en maíz, pero no reponen lo extraído del suelo.

Asimismo, el azufre es otro de los nutrientes frecuentemente deficiente en gran parte de los suelos de la región maicera templada de Argentina [10]. Esta deficiencia está asociada a la constante disminución de la materia orgánica, debido al remplazo de la ganadería extensiva o pastoril por sistemas agrícolas con rotaciones de cultivos que dejan un bajo aporte de carbono al suelo. La dosis media nacional en maíz es de sólo 2 kg/ha de S y puede considerarse deficitaria. Para aumentar el rendimiento sostenidamente en el tiempo, la fertilización azufrada debe apuntar mínimamente a la reposición de lo exportado en el grano en lotes con buena provisión y a reconstruir los niveles en los lotes con mucha historia de agricultura continua y bajo contenido de materia orgánica. Otros nutrientes que son considerados como limitantes en la producción son el zinc, magnesio y boro. Actualmente, preocupan los niveles de potasio en zonas de suelos más pesados, al este del país, ya que los niveles han caído sustancialmente en relación a la disponibilidad original en los suelos. El incremento en las deficiencias de potasio tendrá un impacto importante en la rentabilidad del cultivo, tanto por la merma de rendimiento, como por el costo adicional en fertilizante.

Si bien no existen datos oficiales, se estima que menos del 25% de los productores argentinos realiza análisis de suelo. Esto es particularmente grave, ya que, sin un diagnóstico inicial y un monitoreo continuo de la disponibilidad de nutrientes, es difícil definir las estrategias de fertilización que maximicen el retorno de cada unidad aplicada de fertilizante en la rotación. Menos frecuente aún, es la caracterización de los lotes mediante el perfil cultural, a fin de establecer problemas de estructura de suelo que limiten exploración del perfil por las raíces del cultivo.

Fechas de siembra y arreglo espacial

En Argentina existe mucha información sobre la fecha y el arreglo espacial, distancia entre surcos y distancia entre plantas, que se renueva periódicamente ya que los tiempos óptimos dependen del cultivo que se utilice y de las condiciones edafoclimáticas [13, 14].

La fecha de siembra tiene alto impacto en el rendimiento del cultivo de maíz. Determina la oferta de recursos ambientales y la ubicación del período crítico en la definición de rendimiento. Este periodo es en torno a la floración del cultivo donde se define el número de granos, que es el principal componente del rendimiento. En la región templada, las siembras de septiembre u octubre poseen mayor potencial de rendimiento, por exponer la floración en el momento de mayor radiación, pero este rendimiento es más inestable por el mayor riesgo debido a menor probabilidad de precipitaciones y mayor tasa de evapotranspiración en el cultivo.

Cuando ocurren condiciones de sequía, se reduce el número de granos por espiga produciendo pérdidas de rendimiento. En las siembras de principios de diciembre, la floración ocurre a mediados de febrero con menor intensidad de radiación y menor probabilidad de que ocurran las consecuencias adversas del estrés hídrico. Los cultivos sembrados en esta fecha tienen menor potencial pero mayor estabilidad del rendimiento. Por ejemplo, en el norte de la provincia de Buenos Aires, durante ocho años de experimentación, se observó que mientras algunos cultivares en siembras tempranas podían alcanzar rendimientos de 14 o 15 t/ha, en las siembras de principios de diciembre, los rendimientos fueron más bajos pero estables alrededor de 10 t/ha (Fig. 4), [15].

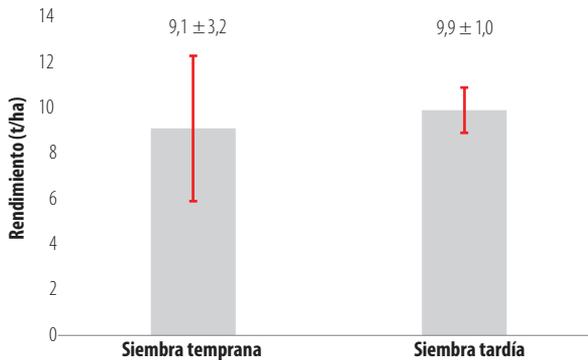


Figura 4. Rendimiento medio \pm desvío estándar de ensayos de maíz conducidos en la Estación Experimental Agropecuaria INTA Pergamino durante 8 años [15].

La densidad del cultivo, la distancia entre surcos y la homogeneidad de la distribución espacial y temporal de la emergencia de las plantas tiene un gran impacto en la construcción de un follaje eficiente para el uso de radiación, agua y nutrientes disponibles. Si bien los híbridos actuales son más plásticos en cuanto a la densidad óptima que los de la década pasada, esta sigue siendo una variable de manejo en la cual se puede lograr un aumento del rendimiento, ya que densidades mayores o menores al óptimo generan pérdidas de rendimiento. La densidad óptima depende del híbrido y el ambiente en que será cultivado, por lo que es recomendable seguir las indicaciones de los semilleros para cada situación de cultivo.

La densidad de siembra es una variable a manejar críticamente y con estrategias definidas por la calidad del ambiente, la disponibilidad de agua útil en suelo hasta una



profundidad de dos metros, los resultados del análisis del suelo y la disponibilidad de pronósticos climáticos confiables. Para lograr el arreglo espacial elegido es necesario una calidad de siembra óptima con equipos de siembra que aseguren una profundidad y distribución de semillas homogéneas. La heterogeneidad en la siembra da como resultado plantas de diferente tamaño con menor rendimiento por hectárea y mayor propensión a vuelco en el cultivo. La actualización y mantenimiento de las sembradoras tanto como el monitoreo constante de la siembra, son esenciales para asegurar la correcta implantación del cultivo.

Dentro de un mismo lote de cultivo hay variaciones ambientales que crean microambientes con diferentes demandas tecnológicas. Ante estas condiciones, el uso de densidades y niveles de fertilización variables, mejoran la eficiencia en la utilización de insumos y la productividad del cultivo incrementando el rendimiento en comparación al que se logra con un manejo homogéneo. Las tecnologías de agricultura de precisión son cada vez más accesibles a productores y contratistas y sería deseable lograr un mayor nivel de adopción de este tipo de agricultura que es aún escasa y tiene mucho potencial de expansión [16, 17].

Protección del Cultivo

Las malezas, plagas y enfermedades constituyen factores que reducen el rendimiento. El monitoreo deficiente, la escasa adopción del manejo integrado de organismos perjudiciales y decisiones desacertadas en la combinación de fitosanitarios y sus dosis, son algunas de las causas principales de mayores costos en protección vegetal y en el aumento de la aparición de organismos resistentes. En los últimos años, el uso de un reducido número de principios activos ha producido un aumento en la frecuencia de malezas y plagas resistentes a fitosanitarios. Un ejemplo de esto es la alta frecuencia de malezas resistentes al herbicida glifosato, que fuera intensamente utilizado luego de la liberación al mercado de cultivares de soja y de maíz con transgenes de tolerancia al principio activo [18].

La experiencia de los años de agricultura en Argentina nos indica que, si bien los herbicidas son fitosanitarios importantes, no son suficientes para resolver el problema de malezas. La tecnología de aplicación debe ajustarse a las exigencias de cada herbicida y el ambiente debe ser propicio. Un correcto manejo de malezas en maíz comienza conociendo el sistema y los problemas que soporta, para planificar la correcta ejecución de un programa integral, que comienza incluyendo al cultivo en una secuencia donde los componentes permitan interrumpir el ciclo de las malezas, maximizando la interferencia sobre las mismas. En los últimos años se ha observado efectos positivos en el control de malezas mediante el uso de cultivo de cobertura que además contribuyen con mejoras de las propiedades fisicoquímicas del suelo [19].

Las principales plagas del cultivo de maíz son el gusano barrenador del tallo (*Diatraea saccharalis*), el gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda*) y gusano elotero (*Heliothis zea*). La rápida adopción de los eventos transgénicos Bt por los productores de las regiones de cultivo, permitió la ampliación de la fecha de siembra en la región templada y una mayor expansión del cultivo en la región subtropical. Los cultivares comúnmente denominados 'Bt', poseen eventos obtenidos de genes de la bacteria de suelo *Bacillus*



thuringiensis, que producen sustancias (proteínas *Cry*) con efecto insecticida sobre Lepidópteros y algunos Coleópteros.

El uso de híbridos Bt reduce los daños causados por insectos barrenadores, como *Diatraea saccharalis* y *Spodoptera* sp., siendo un importante elemento para el control integrado de estas plagas y reduciendo significativamente las pérdidas directas e indirectas de rendimiento. Actualmente, se ha observado una reducción de la efectividad de los eventos disponibles, debido a la coevolución de las poblaciones de insectos. Esto pone en una posición de vulnerabilidad a los cultivos sembrados más al norte y a las fechas de siembra tardías que están expuestas a mayores poblaciones de insectos. Por ende, es importante proteger los eventos biotecnológicos que aún siguen siendo efectivos mediante la instalación correcta de los refugios [20].

En cuanto a enfermedades, las que más afectan el rendimiento en siembras tempranas de la región templada son la roya común (*Puccinia sorghi*) y la virosis conocida como mal de Río Cuarto (MRCV). En siembras tardías aparecen enfermedades que son frecuentes en regiones a menor latitud como el tizón foliar (*Exserohilum turcicum*). Los cultivos más al norte de la región maicera son afectados por enfermedades más características de ambientes tropicales (complejo del achaparramiento, tizones y otras enfermedades foliares, [21]). En todas las áreas de cultivo, las podredumbres de tallo y espiga son relevantes. Las podredumbres de espiga prevalentes son aquellas causadas por *Fusarium verticillioides*, *F. graminearum*, *Aspergillus flavus* y *Stenocarpella maydis*, que afectan el rendimiento y causan contaminación del grano con micotoxinas [22].

Se han desarrollado técnicas que permiten manejar las enfermedades bajo el concepto de manejo integrado. Entre ellas, la elección de genotipos resistentes es la mejor tecnología disponible para disminuir la reducción de rendimiento por las enfermedades y de hecho se está utilizando resistencia genética en todas las regiones, lo que disminuye sustancialmente el impacto de las enfermedades [23]. Es importante fortalecer las redes de evaluación y generar información científica objetiva para asesores y productores.

Elección del Cultivar

La industria semillera en Argentina está muy desarrollada, a la vanguardia a nivel mundial, tanto en la mejora genética del germoplasma como en la introgresión de transgenes para tolerancia a insectos y herbicidas. Al norte del Paralelo 30 Sur se recomienda el uso de germoplasma subtropical mientras que al sur del mismo se adaptan mejor los materiales genéticos con germoplasma templado. Existe una "interfase" en las proximidades a este paralelo en los que se pueden utilizar cruza entre maíces templados y subtropicales [23].

La gran mayoría de la superficie está cultivada con híbridos simples, de alto potencial de rendimiento; pero, dado el elevado costo de la semilla híbrida, los pequeños productores menos capitalizados o los que tienen sus predios en regiones marginales con alta probabilidad de estrés, siembran variedades de polinización abierta o filiales segregantes de híbridos con las consecuentes pérdidas de productividad. En este tipo de condiciones de cultivo, las variedades de polinización abierta encuentran un ámbito



de difusión, mediante el cual el productor puede adquirir semilla de mejor costo, con un nivel de homogeneidad y tratamientos adecuados para proteger la semilla [24].

El INTA tiene un Programa de Mejoramiento Genético de Maíz que está articulado tanto con universidades como con empresas privadas. Este Programa libera periódicamente líneas endocriadas que son usadas como materiales genéticos en proyectos de investigación o como fuentes de variabilidad y/o parentales de híbridos por la industria semillera local. También se difunden cultivares que constituyen una alternativa para demandas de menor interés para el sector privado, como la agricultura orgánica, de minifundio y algunas calidades diferenciadas.

Entre las variedades de polinización abierta de reciente liberación se encuentran cuatro materiales de grano flint, denominados Cuatero INTA, Bautista INTA, Candelaria Dúo INTA y Adelaida INTA; uno de grano amarillo amiláceo denominado Avatí Sa'y Ju INTA. También se han liberado híbridos simples con caracteres especiales, como Sombra INTA con arquitectura foliar de tipo planófilo, (*i.e.*, con láminas foliares dispuestas en un ángulo mayor a 60 grados en relación al tallo) que produce un alto sombreado del suelo, mejorando la competencia con malezas; Tesai AO INTA con alto contenido de ácido oleico en el aceite, y Balau INTA con grano tipo pisingallo [25]. Todos estos materiales son no transgénicos y constituyen una alternativa para la producción orgánica.

Las redes de evaluación de cultivares generan valiosa información que permiten mejorar la toma de decisiones en cuanto a la genética a utilizar, tanto en rendimiento, sanidad, tolerancia a factores abióticos, ciclo, etc. [26]. La información actual es abundante y de buena calidad para la Región Pampeana pero en las regiones noreste, noroeste, Cuyo y Patagonia norte se deberían generar o incrementar los sitios de evaluación.

Momento de Cosecha y Acondicionado del Grano

La demora en la cosecha de maíz implica pérdidas de rendimiento, calidad e inocuidad. En general, los productores carecen de instalaciones para el secado y acondicionamiento de granos, por lo que realizan un secado en campo esperando que la humedad se acerque lo más posible a la humedad de entrega (14,5 %). En maíces de siembra temprana esto no representa una limitante importante, excepto años puntuales, pero la expansión del área destinada al cultivo de maíz tardío, trajo aparejado que gran parte de la producción argentina tenga un secado a campo, que se prolonga durante el invierno entre 70 y 110 días desde madurez fisiológica [27].

Durante el secado de grano en campo de maíces de fecha tardía, se produce la proliferación de malezas otoño-invernales, deterioro de la calidad comercial por aumento de granos dañados, infestaciones con gorgojos (*Sitophilus sp.*) y contaminación del grano con micotoxinas. Adicionalmente, aumenta la proporción de plantas quebradas y volcadas que elevan las pérdidas de cosecha sobre todo las que ocurren en la plataforma de recolección. La elección de cultivares con tallos fuertes y buen comportamiento a enfermedades de tallo, la protección del cultivo y la elección correcta de la densidad de siembra son prácticas de manejo de gran impacto sobre el rendimiento y calidad del grano [27].



Recientemente, se introdujo el concepto de “cosecha oportuna” de maíz tardío, en torno al 20 % de humedad de grano, cuando la tasa de secado comienza a disminuir. Deberían considerarse la aplicación de algunas medidas con diferente grado de factibilidad, con tendencia a aumentar la capacidad de secado, almacenamiento y secado de granos en origen y en acopios primarios. Otra medida a considerar es establecer una mayor tolerancia (16 %) de humedad de grano a maíces entregados en julio-agosto a fin de alentar la cosecha en el momento oportuno. Es una condición que eventualmente se ofrece en acopios y puertos, por lo que en muchos casos sería necesaria la formalización de esta condición [27].

El rendimiento depende, finalmente, de una recolección eficiente en tiempo y forma de los granos. Para ello es crucial la adecuada regulación de las cosechadoras y sobre todo de las plataformas de recolección, que representan el 70 % de las pérdidas en la cosecha de maíz. Actualmente, aún subsiste un porcentaje considerable de máquinas desactualizadas, con menor capacidad de trabajo y un desgaste importante, que las torna propensas a roturas, atascamientos causantes de demoras en la cosecha. Es importante capacitar y concientizar a los productores y profesionales que realicen un control de cosecha en sus lotes. El último paso, muchas veces desestimado, es el transporte de la producción, donde las pérdidas, en función de la carga neta durante el recorrido, pueden ser hasta 1,05 % para maíz y más aún en camiones con estado deteriorado, siendo indispensable para minimizar estas pérdidas el desarrollo del ferrocarril, la infraestructura vial y un parque de camiones actualizados.

Este análisis de la situación del cultivo en Argentina, con cifras basadas en datos oficiales [28], pone en evidencia la necesidad de llevar a cabo políticas de Estado a fin de dar solución a los problemas de estructura de producción y necesidad de inversiones en el Sector Agropecuario. También resulta evidente la necesidad de fortalecer las redes de investigación y desarrollo, mediante la incorporación de recursos humanos, inversiones y fondos de investigación, a fin de dar respuestas tecnológicas para lograr la intensificación de la producción, en un marco de conservación de los recursos ambientales y de reducción de los niveles de contaminación en toda la diversidad ambiental que presenta la región de cultivo de maíz [29].

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Red Latinoamericana de Maíz y al proyecto CYTED Tech-Maíz (121RT0111) por la gestión para publicar este artículo.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Los tres autores contribuyeron por partes iguales en la recopilación de datos y redacción del artículo.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran no tener conflicto de interés en la publicación de este artículo.



REFERENCIAS

- [1] MINAGRI. Ministerio de Agroindustria (2014). Mapa de siembra de maíz en Argentina. Recuperado de <http://www.elsemiarido.com/>
- [2] SENASA. (2018). Argentina se consolida como principal exportador mundial de maíz pisingallo. Recuperado de <http://www.senasa.gob.ar/senasa-comunica/noticias/argentina-se-consolida-como-principal-exportador-mundial-de-maiz-pisingallo>
- [3] MAGyP. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. (2022). Estimaciones Agrícolas del MAGyP. Recuperado de <http://datosestimaciones.magyp.gob.ar/>
- [4] Bolsa de Comercio de Rosario. (2020). Producción y destino del maíz 2019/20 en Argentina. Recuperado de <https://www.bcr.com.ar/>
- [5] MAIZAR. Asociación Maíz y Sorgo Argentino. 2021. Recuperado de <http://www.maizar.org.ar/>
- [6] Giménez, F. J. (2021) Documento interno del Programa Cereales y Oleaginosas del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.
- [7] García, F. O. (2005). Criterios para el manejo de la fertilización del cultivo de maíz. Presentado en la Jornada "Maíz 2005" organizada por Capacitación Agropecuaria. Córdoba, 1 de Julio. de 2005. Recuperado de <https://www.profertil.com.ar/wp-content/uploads/2020/08/nutricion-en-el-cultivo-de-maiz-ipni-f-garcia-2005.pdf>
- [8] Fontanetto, H. & Keller, O. (2006). Manejo de la fertilización en maíz. Experiencias en la Región Pampeana. INTA – Estación Experimental Agropecuaria Rafaela. Información Técnica Cultivos de Verano. Campaña 2006. Publicación Miscelánea N° 106 85.
- [9] Fontanetto, H., Keller, O., Gambaudo, S., Albrecht, J., Gianinetto, G., Weder, E., Zen, O., Daverede, I. y García F.O. (2010). Respuesta del maíz a la fertilización fosforada en la Región Centro de Santa Fe. INTA – Estación Experimental Agropecuaria Rafaela. Información Técnica Cultivos de Verano. Campaña 2010. Publicación Miscelánea N° 118.
- [10] Sainz Rozas, H. R. (2018). El zinc: un micronutriente limitante para el maíz. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Recuperado de <https://inta.gob.ar/documentos/el-zinc-un-micronutriente-limitante-para-el-maiz>
- [11] Correndo, A. A., Gutiérrez-Boem, F. H., García, F. O., Alvarez, C., Álvarez, C., Angeli, A., Barbieri, P., Barraco, M., Berardo, A., Boxler, M., Calviño, P., Capurro, J. E., Carta, H., Caviglia, O., Ciampitti, I. A., Diaz-Zorita, M., Diaz-Valdez, S., Echeverría, H. E., Espósito, G., Ferrari, M., Ferraris, G. N., Gambaudo, S., Gudelj, V., Iole, J. P., Melchiori, R. J. M., Molino, J., Orcellet, J. M., Pagani, A., Pautasso, J. M., Reussi Calvo, N. I., Redel, M., Rillo, S., Rimski-Korsakov, H., Sainz-Rozas, H. R., Saks, M., Tellería, M. G., Ventimiglia, L., Zorzín, J. L., Zubillaga, M. M. & Salvaggiotti, F. (2021). Attainable yield and soil texture as drivers of maize response to nitrogen: A synthesis analysis for Argentina. *Field Crops Research*. 273:108299. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108299>
- [12] MAGyP - Ministerio de Agricultura Ganadería y Pesca. (2021). 200 millones de toneladas de cereales, oleaginosas y legumbres. Fertilidad y nutrición de suelos. Recuperado de <https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/informe-fertilidad-nutricion-suelos-200mt-magyp.pdf>
- [13] Cirilo, A., Andrade, F., Otegui, M., Maddonni, G., Vega, C. y Valentinuz, O. (2016) Ecofisiología del cultivo de maíz. [Ecophysiology of Maize Cultivation]. En: Eyhéabide, G., Ed., Bases para el manejo del cultivo de maíz, INTA, Argentina, 25-56.
- [14] Ventimiglia, L y Torrens Baudrix, L. (2020). Maíz: Densidad por espaciamiento, campaña 2019/20. Recuperado de <https://inta.gob.ar/documentos/maiz-densidad-por-espaciamiento-campana-2019-20>.
- [15] Presello D. A. (2017). Rendimiento de cultivares de maíz en siembras tempranas y tardías. XII Jornada de Actualización Técnica en Maíz. INTA y AIANBA. Pergamino, 30 de agosto de 2017.
- [16] INTA. (2013). Agricultura de Precisión y Máquinas Precisas. Recuperado de https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta_actualizacion_tecnica_nro_79_-_junio_2013.pdf
- [17] Chartuni Mantovani, E. & Magdalena, C. (2014). Manual de agricultura de precisión Recuperado de <http://www.gisandbeers.com/RRSS/Publicaciones/Manual-Agricultura-Precision.pdf>
- [18] SENASA (2022). Casos confirmados de malezas resistentes en Argentina. Recuperado de <http://www.senasa.gob.ar/casos-confirmados-de-malezas-resistentes-en-argentina>.



- [19] Zanettini, J. L., Orden, N. y Dubo, G. (2019). El cultivo de cobertura en el control de malezas. *Estación Experimental Agropecuaria Pergamino. RTA* 10:39. Recuperado de https://inta.gov.ar/sites/default/files/inta_25_de_mayo_el_cultivo_de_cobertura_en_el_control_de_malezas.pdf
- [20] Perotti, E., Russo, R., López, R., Zari, F., Pradolini, E., Sanmarti, N., Maccari, G., Boero, L. y Gamundi, J. (2014). Evaluación de estrategias de manejo de refugios asociados a cultivos de soja Bt sobre plagas blanco, no blanco y sus depredadores. Para mejorar la Producción 52. Recuperado de <https://inta.gov.ar/sites/default/files/script-tmp-inta-evaluacin-estrategias-manejo-refugios-asociados-.pdf>
- [21] De Rossi, R., Guerra, F., Plaza, M. C., Vuletic, E., Brücher, E., Guerra, G., Couretot, L., Parisi, L. y Magnone, G. (2016), XXIV Congreso AAPRESID. Agosto 2016. Rosario. Provincia de Santa Fe. Argentina. <https://www.aapresid.org.ar/wp-content/uploads/2017/07/Revista-red-de-innovadores-n%C2%BA-156.pdf>
- [22] Presello, D. A., Botta, G., Iglesias, J. y Eyherabide, G. H. (2008). Effect of disease severity on yield and grain fumonisin concentration of maize hybrids inoculated with *Fusarium verticillioides*. *Crop Protection* 27:572–576. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2007.08.015>
- [23] Presello, D. A., Eyherabide G. H., Iglesias, J., Mroginski, E. y Lorea R. D. (2015). Cultivares. Criterios para su elección. Publicación del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. En: Eyherabide Ed. Publicación del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.
- [24] Martínez, J., Llovet, J.A. & Presello, D.A. (2018). Candelaria duo INTA una variedad de maíz para agricultura familiar y orgánica. *Revista de Tecnología Agropecuaria-RTA.* 10 (37): 21-24. Recuperado de https://repositoriosdigitales.mincyt.gov.ar/vufind/Record/INTADig_ee23f7eb61fc2e4449e52372307f6d1
- [25] INASE. Instituto Nacional de Semillas. (2022). Catálogo Nacional de Cultivares. Recuperado de <https://gestion.inase.gov.ar/consultaGestion/gestiones>.
- [26] Ferraguti, F., Magnano, L., Malmantile, A. y Espósito, M. A. (2021). Rendimiento y estabilidad de híbridos comerciales de maíz de primera. Resultados de la Red de la EEA INTA Oliveros y sus AERs - Campaña 2020-21. Recuperado de https://inta.gov.ar/sites/default/files/9.inta_rendimiento-hibridos-analisis-iga-red-maiz-primer.pdf.
- [27] Ferraguti, F. (2020). Deterioro de la calidad e inocuidad durante el secado a campo del maíz. Recuperado de <https://inta.gov.ar/sites/default/files/inta-maiz-fecha-siembra-tardia.deterioro-calidad-e-inocuidad-secado-a-campo.ferraguti.pdf>
- [28] Estimaciones Agrícolas del MAGyP. Recuperado de: <http://datosestimaciones.magyp.gov.ar/reportes.php?reporte=Estimaciones>
- [29] Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Guía práctica para el cultivo de maíz. Recuperado de: https://inta.gov.ar/sites/default/files/script-tmp-guia_prctica_para_el_cultivo_de_maiz.pdf

Situación del cultivo de maíz en Guatemala: principales limitaciones en la productividad

Orsy Franklin Chávez Martínez^{1*}

¹Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícolas - ICTA, Programa de Maíz/Ajonjolí.
Sector B, La Alameda, Chimaltenango, Chimaltenango, Guatemala.

*Autor para correspondencia/Corresponding author: maiz.cialc@icta.gob.gt

Maize cultivation in Guatemala: main limitations

Resumen

El maíz (*Zea mays* L.) es el cultivo más importante de Guatemala, debido a que tiene un papel clave en la dieta alimenticia de su población. La producción no cubre la demanda nacional, en especial el maíz amarillo, viéndose en la necesidad de importar este cereal. Actualmente, la productividad del cultivo es bastante baja, debido a una serie de limitantes que afrontan los pequeños productores. El rendimiento promedio nacional es de 2154 kg ha⁻¹, que es bastante bajo comparado con el de los mayores productores del mundo. En general, el maíz se siembra bajo el régimen de lluvias; sin embargo, el efecto negativo del clima afecta la producción nacional. Las plagas y enfermedades son otro problema que afrontan los productores, que muchas veces tienen acceso limitado a los insumos de producción más importantes como fertilizantes, semilla y pesticidas. El uso de semillas mejoradas y el acceso a ellas son clave para contribuir al aumento de la productividad. El Instituto de Ciencia y Tecnologías Agrícolas (ICTA) ha generado variedades e híbridos de maíz adaptados a los sistemas productivos del país. Lastimosamente, estas tecnologías no han sido diseminadas a los más necesitados por falta de una estrategia de promoción y adopción, a pesar de que se hacen esfuerzos significativos ante la falta de presupuesto del Gobierno. El ICTA ha puesto a disposición del público nuevos híbridos como el ICTA HB-17^{TMA} (grano blanco), e ICTA Grano de Oro (grano amarillo); estos cultivares poseen resistencia al Complejo Mancha de Asfalto; también, liberó el ICTA HB-18A^{CP+Zn}, el primer híbrido biofortificado del mundo, el cual posee alta calidad de proteína y mayor contenido de zinc.

Palabras clave: híbrido, variedad, rendimiento, tecnología, semilla

Abstract

Corn (*Zea mays* L.) is the most important crop in Guatemala. It has a key role in the sustenance of the population. The production does not cover the national demand, especially yellow corn, producing the necessity to import this cereal. Currently, the productivity of the crop is quite low, due to a series of limitations faced by small producers. The national average yield is 2154 kg/ha⁻¹, which is lower than other corn producers in the region. Corn is usually planted under the rainy regime; however, the negative effect of the weather affects national production. Pests and diseases are another problem faced by producers, who often have limited access to the most important production inputs such as fertilizers, seeds, and



Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /
Edited by:
Gabriela Albán

Recibido /
Received:
01/02/2022

Aceptado /
Accepted:
30/03/2022

Publicado en línea /
Published online:
16/05/2022



pesticides. The use of improved seeds is the key to increase productivity. The Institute of Agricultural Science and Technology (ICTA) has generated varieties and hybrids of corn adapted to the productive systems of the country. Unfortunately, these technologies have not been disseminated to most farmers due to the lack of a promotion and adoption strategy, despite significant efforts being made in the country. ICTA has made new hybrids available to the public, such as ICTA HB-17^{TMA} (white grain), and ICTA Grano de Oro (yellow grain). These cultivars have resistance to the Tar Spot Complex. Besides, the Institute has released ICTA HB-18^{ACP + Zn}, the first biofortified hybrid in the world, which has high quality protein and high zinc content.

Keywords: hybrid, variety, yield, technology, seed

INTRODUCCIÓN

Durante los últimos siglos, el maíz es el cereal que mayor importancia ha tenido en diferentes sectores económicos a nivel mundial. En países desarrollados, el maíz se utiliza como forraje para la alimentación animal, como materia prima para la industria, y, últimamente, para la fabricación de biocombustibles. Lo contrario sucede en países de África y América Latina, ya que una buena parte de la producción o importación de maíz es destinada a la alimentación humana; por lo tanto, en estas regiones este cereal continúa siendo un elemento importante para la sobrevivencia de muchas familias que habitan en el área rural y que son de escasos recursos económicos [1].

En el año 2020, a nivel mundial se sembraron 201,98 millones de hectáreas (ha) con una producción de 1162,3 millones de toneladas (t), siendo Estados Unidos, China, Brasil y Argentina los mayores productores de maíz del mundo. En ese mismo año, Estados Unidos produjo 360,25 millones de toneladas en 33,37 millones de hectáreas, con un rendimiento promedio de 10 794 kilogramos por hectárea (kg ha⁻¹); China produjo 260,87 millones de toneladas en 41,29 millones de hectáreas, con un rendimiento promedio de 6318 kg ha⁻¹; Brasil produjo 103,96 millones de toneladas en 18,25 millones de hectáreas, con un rendimiento promedio de 5696 kg ha⁻¹; y Argentina produjo 58,39 millones de toneladas en 7,73 millones de hectáreas, con un rendimiento promedio de 7564 kg ha⁻¹ [2].

En 2019, el Producto Interno Bruto (PIB) fue de USD \$78 461,7 millones, y la contribución en la última década de la agricultura al PIB fue del 14%, siendo este rubro el principal generador de empleo y divisas del país [3]. En 2020, Guatemala produjo 1,91 millones de toneladas en 870 724 hectáreas, con un rendimiento promedio de 2154 kg ha⁻¹, este rendimiento comparado con el de los mayores productores del mundo, es bastante bajo. El 90% de la producción corresponde a maíz de grano blanco y 10% de maíz de grano amarillo. La producción de maíz no alcanza para cubrir la demanda de la población; la demanda insatisfecha de maíz blanco es de 65 357 t y para maíz amarillo 988 364 t, razón por la cual se importa maíz de Estados Unidos y México, principalmente [2, 4].

Es importante entonces, que el país invierta en esfuerzos por aumentar los rendimientos del maíz tanto blanco como amarillo para satisfacer la demanda interna y por



consiguiente disminuir las importaciones. En Guatemala existen algunas limitaciones que afectan la productividad del cultivo, por ejemplo, la mayor parte de la producción se da en época invernal afectando directamente el rendimiento, pero también el déficit de agua puede repercutir negativamente en la producción de maíz. Por otro lado, la escasa asistencia técnica y acceso a insumos de producción es otro limitante, especialmente en los pequeños agricultores o productores. También, las plagas causan pérdidas significativas en la producción, poniendo en riesgo la seguridad alimentaria de la población más vulnerable. En ese sentido, el uso de semillas mejoradas permite obtener un mejor rendimiento. Por otro lado, a pesar de que el sector público ha puesto a disposición de los productores semillas mejoradas, no existe una estrategia formal para la promoción de estas tecnologías, lo que causa que el nivel de adopción sea bajo.

SITUACIÓN DEL CULTIVO DE MAÍZ EN GUATEMALA

El maíz es un pilar fuerte en la dieta alimenticia de la población y contribuye, en gran medida, en la seguridad alimentaria de familias de escasos recursos del área rural. Una forma peculiar en que se consume el maíz es en tortilla, la cual es elaborada a partir del grano entero de este cereal. El consumo promedio per cápita por año es de 110 kg y puede llegar a duplicar su valor, cuando el ingreso económico familiar es muy bajo. Además, es un símbolo cultural que permanece arraigado en las costumbres guatemaltecas y que persisten en la actualidad [5].

A pesar de todo, el maíz aún es considerado un cultivo de poca relevancia debido a que, en términos monetarios, no aporta mucho a la economía campesina y su importancia es más social que económica. A pesar de esta apreciación, este cultivo ocupa la mayor superficie de siembra a nivel nacional, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación (FAO), estimó para el 2019 un 35,41% de área con potencial de uso agrícola del país, de esta superficie, el maíz ocupa el 22,5%, la mayor comparada con otros cultivos [5, 2]. La amplia distribución a nivel nacional es suficiente para brindarle especial importancia por el papel que juega en las familias guatemaltecas.

PRODUCCIÓN Y RENDIMIENTOS

La producción de maíz se divide en dos zonas: el Trópico Bajo que va de los 0 a 1400 metros sobre el nivel del mar (m s.n.m.) y la zona del Altiplano que va de los 1401 a 2800 m s.n.m. El Trópico Bajo por lo general posee áreas con buena distribución de precipitación pluvial, y la superficie de siembra de maíz es mayor comparada con el Altiplano [6]. La zona del Altiplano, por lo general se considera con bajo potencial para cultivar maíz, principalmente porque en su mayoría se cultiva en laderas. En esta zona se han hecho esfuerzos por diversificar con cultivos más rentables que el maíz, con hortalizas como ejemplo, sin embargo, los resultados no han sido buenos. Una de las razones es que sigue siendo el cultivo con mayor superficie de siembra en la zona, incluso donde ya existe diversificación de cultivo el maíz no se deja de sembrar, y no solo por razones culturales, sino también para conservar una mínima garantía de seguridad alimentaria para las familias más necesitadas [5].



El maíz es cultivado en los 22 departamentos del país, pero Petén es el mayor productor con el 18% (156 730 ha), le sigue Alta Verapaz con el 10% (87 072 ha) y luego El Quiché con el 8% (69 658 ha) (Fig. 1). Estos tres departamentos juntos producen el 36% de la producción nacional [7].

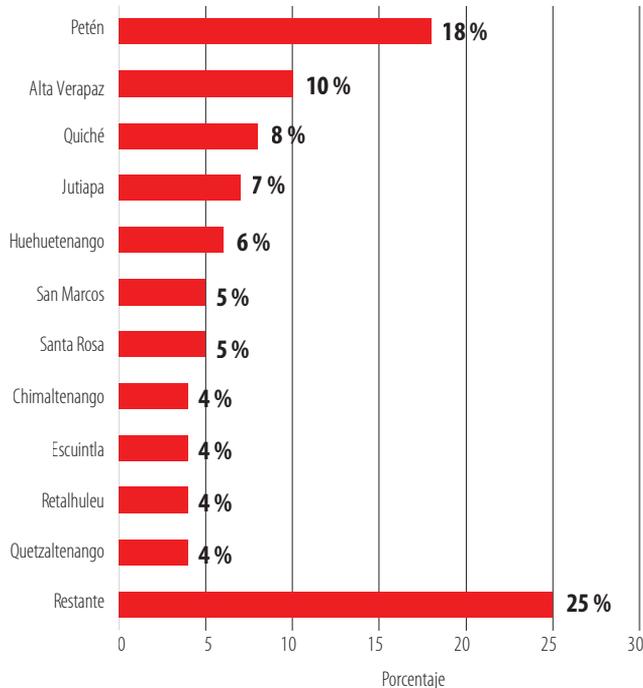


Figura 1. Distribución de la producción de maíz en Guatemala a nivel departamental para el año 2018.
Fuente: MAGA.

El 90% de la producción de maíz es de grano blanco y es protegido por el mercado interno, siendo poco el efecto por precios internacionales. El índice de suficiencia de maíz blanco es de 96,51% y cubre la totalidad de la demanda. Por otro lado, sucede lo contrario con el maíz amarillo, ya que solamente representa el 10% de la producción nacional, es afectado por los precios internacionales y el índice de suficiencia es de 16,56%, lo que significa que se importa más del 80% para cubrir la demanda, especialmente en el sector industrial donde más se utiliza [4, 7].

El rendimiento ha tenido un leve aumento durante los últimos diez años, ya que, en 2010, el rendimiento promedio era de 1994 kg ha⁻¹, esto quiere decir que en la última década aumentó 160 kg ha⁻¹ [2]. Es importante que el país continúe con los esfuerzos para aumentar el rendimiento promedio nacional del maíz, tanto blanco como amarillo para disminuir las importaciones. Para tener un mejor panorama de la situación del nivel tecnológico del cultivo y de las principales limitantes en la producción, a continuación, se hace una descripción de estas. Asimismo, se describe también el esfuerzo que hace el sector público agrícola, especialmente con el desarrollo de semillas mejoradas.



LIMITACIONES EN LA PRODUCTIVIDAD DEL CULTIVO DE MAÍZ

Se estima que en Guatemala 1 007 000 agricultores se dedican a la producción de maíz, de ellos, el 92% lo hacen por su propia cuenta, mientras que el resto son productores organizados y entidades privadas [8, 9]. Los pequeños productores de Guatemala se caracterizan principalmente por poseer en promedio 0,6 hectáreas de tierra para cultivo, normalmente están en pobreza o pobreza extrema, y representan el 60,8% del total de productores [3]. El rol del maíz para los pequeños productores es muy importante en la dieta de sus familias, muchas veces la producción no es suficiente para cubrir su demanda a lo largo del año, por ello se ven obligados a comprar este cereal, siendo los hogares que están en pobreza extrema los más vulnerables, ya que se pone en riesgo la seguridad alimentaria.

El nivel tecnológico de los pequeños productores es bajo; la mayoría no posee sistema de riego, algunos no utilizan semilla mejorada, el acceso a insumos como fertilizantes y pesticidas es muy limitado, además de esto las tierras no son aptas para el cultivo de maíz. Aunado a esto, están expuestos al riesgo climático, daños de plagas en el cultivo. Todos estos problemas causan una disminución considerable en el rendimiento del cultivo [10].

En el caso del maíz, la producción es en su mayoría sin riego, las siembras se dan en temporal de lluvias, en ocasiones los efectos del clima como el exceso y déficit de lluvias afectan seriamente la producción nacional, por lo tanto, el acceso a riego es un limitante en el sector maicero. Una alternativa, es el uso de semillas con tolerancia a la sequía, acceso a información climática en todo tiempo, seguros agrícolas, entre otras.

El Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación (MAGA), realizó en 2012 el Diagnóstico Nacional de Riego, donde se determinó que solo irrigaban 337 471 hectáreas, representando el 29% del total del área con vocación agrícola. El MAGA, implementó la política de promoción de riego 2013-2023, que básicamente es invertir en infraestructura pública como centros de almacenamiento y vías de conducción de agua hasta un punto donde los productores puedan tener acceso a sus parcelas a precios competitivos para incrementar su área de cosecha, su productividad y sus ganancias [11].

La enfermedad conocida como el Complejo Mancha de Asfalto (CMA) afecta las producciones de maíz en el norte y este del país, en 2016 esta enfermedad causó la disminución del rendimiento en más del 75% en esas regiones [12]. Además, Guatemala ocupa el primer lugar de América Latina y el sexto lugar a nivel mundial en desnutrición crónica infantil, ya que el 49,8% de los niños tienen este padecimiento [13]. El consumo de maíz en la dieta de las familias pobres es mayor, por ello es importante mejorar el contenido nutricional del grano.

En un estudio realizado por el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) sobre el análisis de la cadena de valor del maíz en Guatemala, donde concluyeron que el nivel tecnológico sigue siendo bajo, no se niega el hecho de que entidades públicas y privadas brindan asistencia técnica, pero falta mucho por hacer. También, evidenció la disponibilidad de semillas mejoradas de parte del sector público, aunque no ha logrado un gran alcance en los productores de maíz [14].



Por otro lado, están los agricultores catalogados como comerciales que representan el 26,5%, estos poseen más de 3,5 ha de tierra de cultivo y el nivel tecnológico con que cuentan es mayor comparado con los pequeños productores. La mayoría cuenta con sistema de riego, utilizan semillas mejoradas, además, el uso de insumos en la producción es mayor, estos obtienen un beneficio económico ya que comercializan su producción. La mayoría de estos productores se encuentran en el trópico bajo [3].

APORTE DEL SECTOR PÚBLICO AGRÍCOLA A LA PRODUCTIVIDAD DEL CULTIVO DE MAÍZ

Es cierto que otros factores de producción, como la mejora en la nutrición, manejo integrado de plagas, mecanización, entre otros, también contribuyen al incremento de la productividad del cultivo de maíz. Pero el uso de semillas mejoradas, garantiza en una buena parte el aumento del rendimiento del cultivo, es por ello que el trabajo de instituciones públicas y privadas juegan un papel importante en la generación de cultivares mejorados de maíz que atiendan a las diferentes problemáticas que afrontan los pequeños y grandes productores [15].

La semilla es el insumo de partida para la producción de cualquier cultivo, esta debe ser de buena calidad para garantizar un buen rendimiento. La semilla debe adaptarse a las condiciones de los agricultores y debe de producir plantas vigorosas para alcanzar un excelente rendimiento. Las semillas mejoradas juegan un rol importante y estratégico en el cultivo de maíz ya que se garantiza un mejor aprovechamiento de los recursos de producción, es decir, las semillas mejoradas expresarán un buen potencial de rendimiento con un adecuado modelo productivo [16]. Por otro lado, los precios de las semillas mejoradas para los pequeños agricultores son un factor importante, ya que si el precio es demasiado alto prefieren utilizar su propia semilla (semilla nativa) la cual está más adaptada a su sistema productivo, las exigencias tecnológicas son menores, pero generalmente el rendimiento es bajo. Es por eso que, si el agricultor está dispuesto a utilizar semilla mejorada, se le brinde acompañamiento técnico para aprovechar el potencial de la semilla [17].

En muchos países de América Latina la semilla mejorada es clave para mejorar la productividad del cultivo de maíz. En México y Centro América, el uso de semillas mejoradas por parte de los productores es baja, predomina el uso de variedades de polinización libre que el uso de híbridos. El Salvador es una excepción ya que en este país son más utilizados los híbridos de maíz, superando el 50% del área sembrada [18].

Según el Decreto Legislativo No. 68-72, el Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícolas (ICTA), es la institución de derecho público responsable de generar y promover el uso de la ciencia y tecnología agrícolas en el sector respectivo. La investigación es clave para el desarrollo tecnológico de los cultivos en cualquier país. Según el Banco Mundial, en 2018 el gasto en investigación y desarrollo de Guatemala fue de 0,029% de su PIB [19], mientras que para ese mismo año Israel aportó en investigación y desarrollo el 4,941% de su PIB [20]. Esto evidencia la poca importancia que le da el gobierno de Guatemala a la investigación. A pesar de esta limitante, el ICTA realiza



grandes esfuerzos para contribuir con el aumento de la productividad del maíz, poniendo a disposición de pequeños y grandes productores de maíz, semillas mejoradas adaptadas a los diferentes ambientes del país.

El ICTA ha desarrollado variedades e híbridos de maíz para que los productores tengan opciones de semillas mejoradas adaptadas a su ambiente y sistema de producción. Es importante resaltar el apoyo que le ha brindado al ICTA el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) en el desarrollo de nuevas variedades e híbridos de maíz. A continuación, se describen los tres híbridos más recientes puestos a disposición de los productores y que han generado un impacto positivo en la problemática actual del cultivo de maíz.

El ICTA en 2018, puso a disposición de los productores el híbrido de maíz de grano blanco ICTA HB-17^{TMA}, el primero con resistencia al CMA (Tabla 1) en Guatemala. Este híbrido es una alternativa para los pequeños productores de maíz en zonas con presencia del CMA, ya que no es necesario aplicar fungicidas para su control, contribuyendo a la reducción de los costos de producción [12].

El ICTA, liberó también en 2018, el híbrido de maíz de grano blanco ICTA HB-18^{ACP + ZN}, el primer híbrido biofortificado liberado a nivel mundial con alta calidad de proteína y alto zinc (Tabla 1). Una tortilla de este híbrido aporta un 50% más de zinc que una tortilla elaborada con maíz comercial y hasta un 60% más de Lisina y Triptófano [13], este híbrido está recomendado para la región del Trópico Bajo. Actualmente el ICTA está trabajando en el desarrollo de variedades biofortificadas en la región del Altiplano para contribuir en la mejora nutricional de las familias de escasos recursos que padecen de desnutrición.

Para apoyar el sector industrial que importa más del 80% de maíz amarillo porque la producción nacional no cubre la demanda nacional, en el año 2021, el ICTA puso a disposición de los productores el híbrido ICTA Grano de Oro (Tabla 1). De igual forma que el ICTA HB-17^{TMA}, posee resistencia al CMA, disminuyendo el uso de fungicidas para el control de esta enfermedad. Este híbrido ha tenido una buena aceptación por su rendimiento y la textura de grano (semicristalino) [21].



Tabla 1. Características de los principales híbridos y variedades de maíz del ICTA que actualmente están a disposición de los productores de Guatemala.

Nombre	Híbrido / Variedad	Rendimiento (kg ha ⁻¹)	Color	Región	Principal característica
ICTA B-9 ^{ACP}	Variedad	4,220	Blanco	Trópico Bajo	Alta calidad de proteína
ICTA B-15A ^{ACP+Zn}	Variedad	4,220	Blanco	Trópico Bajo	Alta calidad de proteína y alto zinc
ICTA HB-18 ^{ACP+Zn}	Híbrido triple	5,974	Blanco	Trópico Bajo	Alta calidad de proteína y alto zinc
ICTA HB-17 ^{TMA}	Híbrido triple	7,467	Blanco	Trópico Bajo	Resistencia al Complejo Mancha de Asfalto
ICTA Grano de Oro	Híbrido triple	5,843	Amarillo	Trópico Bajo	Resistencia al Complejo Mancha de Asfalto
ICTA B-7 ^{TS}	Variedad	3,246	Blanco	Trópico Bajo	Tolerancia a sequía
ICTA V-301	Variedad	3,896	Blanco	Altiplano	Normal
ICTA Don Marshall	Variedad	3,896	Amarillo	Altiplano	Normal
ICTA Compuesto Blanco	Variedad	3,896	Blanco	Altiplano	Normal
ICTA San Marceño	Variedad	3,896	Amarillo	Altiplano	Normal

Fuente: Programa de Investigación de Maíz/Ajonjolí-ICTA, 2022.

En cuanto al uso de semillas de maíz transgénico, Guatemala tenía prohibido desde 1998 el uso de germoplasma genéticamente modificado, abarcando su prohibición en la investigación, producción e importación. Existen diversas opiniones sobre este tipo de tecnología, ya que pone en riesgo la biodiversidad de maíz que existe en Guatemala. Sin embargo, recientemente en octubre pasado entró en vigencia el Reglamento Técnico Centroamericano de Bioseguridad de Organismos Vivos Modificados, según resolución Ministerial No. 60-2019, en el cual permite la importación, comercialización y siembra de semillas modificadas de productos para el consumo humano y animal [22, 23]. Esta tecnología de ser utilizada adecuadamente puede contribuir a incrementar la productividad del cultivo de maíz en la región, y solamente estaría permitido su uso en la región del Trópico Bajo para resguardar la biodiversidad de maíces que existen en el Altiplano Guatemalteco.

Limitaciones para el acceso a semillas mejoradas

Especialmente en los pequeños agricultores, existen barreras que no permiten la adopción de estas tecnologías. Algunas barreras están relacionadas con la escasa asistencia técnica para aprovechar el potencial de la semilla, falta de promoción y



difusión de semillas mejoradas, dificultades para obtener créditos agrícolas para invertir en el cultivo, mala calidad de la semilla y falta de disponibilidad de semilla en el momento oportuno [24].

Por ejemplo, en el Altiplano de Guatemala menos del 5% de los productores de maíz utilizan semillas mejoradas, ellos prefieren utilizar su propia semilla o en su defecto realizan intercambio entre productores [25]. A pesar de que el ICTA cuenta con cuatro variedades mejoradas para esa zona, existe resistencia de los productores a la utilización de variedades mejoradas. Debido a que en el Altiplano predomina el uso de variedades nativas, que son maíces adaptados a los ambientes específicos de los productores, el rendimiento no es competitivo debido a que los maíces tienden a ser muy altos, y esto contribuye a la caída de las plantas.

Las variedades nativas están arraigadas a la cultura del agricultor debido a que estas generalmente han sido heredadas de generación en generación, y presentan mayor adaptación a las condiciones marginales de su sistema de producción [26]. Lo contrario pasa en el trópico, ya que el uso de semillas mejoradas es mayor que en el Altiplano, pero menos del 40% de las áreas productoras de maíz utilizan semillas mejoradas.

Las semillas mejoradas cumplirán su función cuando están en las manos de los productores, de nada serviría que se hagan esfuerzos de investigación si el producto no llega a su destinatario final. La brecha entre el campo experimental y el agricultor es bastante grande y esa distancia se cubre a través de la tecnología de semillas. [15].

En Guatemala, el MAGA es la institución responsable de transferir tecnologías agrícolas por medio de la extensión rural, y es un pilar clave para que el ICTA disemine sus tecnologías. Se le debe prestar atención a este cultivo debido a la importancia económica y social mencionada anteriormente, especialmente para los pequeños productores que poseen una brecha bastante alta en el nivel tecnológico comparado con los grandes comerciales. Por su parte, el ICTA realiza también trabajos de transferencia de tecnología en sus sedes experimentales, promocionando las semillas mejoradas de maíz con su respectiva alternativa tecnológica para que los productores puedan incrementar el rendimiento y por lo tanto la productividad.

Por otro lado, no cabe duda que la pandemia del COVID-19 ha causado daños en la salud y pérdidas humanas irreparables. A pesar de las medidas sanitarias tomadas por los gobiernos, los efectos económicos y productivos se acentuarán posteriormente. En ese sentido los gobiernos se han dado cuenta de la importancia que tiene la agricultura para la alimentación de sus habitantes, continúa siendo una actividad estratégica que deben impulsar, no solo con el apoyo de los órganos del Estado, sino también de su población para mantener funcionando adecuadamente el sistema alimentario proveniente de la agricultura para que esta crisis que aún se está viviendo no se transforme en una crisis alimentaria [15].

El MAGA y el ICTA juegan roles importantes en la certificación de campos de producción y en la industria de semillas. Actualmente, el ICTA vende los progenitores de sus híbridos a empresas semilleras, las cuales cumplen un papel importante en la distribución de semillas mejoradas de maíz. No obstante, está el sector privado con sus propios híbridos,



sin embargo, el costo de la semilla es bastante alto. En el país el 49% de los productores de maíz utiliza su propia semilla (semilla nativa), el 46% utiliza semilla certificada del sector privado y solamente el 5% utiliza semilla certificada del ICTA, principalmente en la región del trópico [15].

A pesar de los esfuerzos de ambas instituciones hace falta llegar a muchos pequeños productores de maíz con semillas mejoradas para mejorar sus técnicas de cultivo. Aunado a esto, la falta de promoción de las tecnologías generadas (semillas mejoradas) por el ICTA es un problema, siendo necesario contar con estrategias de promoción. Actualmente, se está implementando el proyecto denominado "Reactivación Productiva y Económica de los Agricultores de Guatemala", para su ejecución se firmaron tres convenios para tres años entre el ICTA y el MAGA [15]. Estos convenios le permitirán al ICTA producir semilla certificada de sus principales variedades e híbridos financiados por el MAGA, posteriormente el MAGA promocionará y distribuirá la semilla gratuitamente a los productores más necesitados.

CONCLUSIONES

En el análisis realizado se determinó que el sector maicero de Guatemala no es lo suficientemente competitivo para cubrir la demanda nacional. Las importaciones de maíz evidencian la baja productividad del cultivo, además del bajo nivel tecnológico con el que se dispone, especialmente para los pequeños productores. Se determinó que hace falta realizar investigación en otras áreas de manejo agronómico, como, por ejemplo, densidades de siembra, recomendaciones de fertilización, entre otras. El ICTA, por su parte sabe de la importancia de realizar investigación en estos otros componentes, por ello, continuará trabajando para que, en conjunto con el fitomejoramiento, fortalezca la productividad del cultivo.

La escasa promoción de las semillas mejoradas con que cuenta el ICTA y que están a disposición de los productores de maíz es otro problema identificado. Las semillas no llegan a las manos de los productores porque no existe una estrategia para diseminar las tecnologías y la falta de presupuesto del ICTA limita esta labor. Sin embargo, actualmente se ejecuta un proyecto en convenio con el MAGA para producir semilla certificada de diferentes variedades e híbridos para llevar a los agricultores más necesitados estas semillas.

CONFLICTO DE INTERÉS

El autor declara que no existen conflicto de intereses en el presente trabajo.



REFERENCIAS

- [1] Hernández, J. A. (2009). *El origen y la diversidad del maíz en el continente americano*. Greenpeace México. Recuperado de: <http://www.funsepa.net/guatemala/docs/el-origen-y-la-diversidad-del.pdf>
- [2] Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2022). *Datos sobre alimentación y agricultura* - FAOSTAT. Recuperado de: <https://www.fao.org/faostat/es/#home>
- [3] Aguilar, E. R., Chávez, O. F., y Mazariegos, C. V. (2020). *Evaluación Agrícola Rápida / Análisis de Sistemas Agroalimentarios de Guatemala*. World Central Kitchen. p. 120.
- [4] Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación. (2018). *Informe de situación de Maíz Blanco*. Dirección de Planeamiento (DIPLAN). Recuperado de: https://www.maga.gov.gt/sitios/diplan/download/informacion_del_sector/informes_de_situacion_de_maiz_y_frijol/2018/08%20Informe%20Situaci%C3%B3n%20Del%20Ma%C3%ADz%20Blanco%20Agosto%202018.pdf
- [5] Fuentes, M. R., van Etten, J., Ortega, A., y Vivero, J. L. (2005). Maíz para Guatemala: Propuesta para la Reactivación de la Cadena Agroalimentaria del Maíz Blanco y Amarillo, *SERIE "PESA Investigación", n°1*. FAO Guatemala.
- [6] Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícolas (2002). *El cultivo de maíz en Guatemala: una guía para su manejo agronómico*. Recuperado de: <https://www.icta.gov.gt/publicaciones/Maiz/cultivoMaizManejoAgronomico.pdf>
- [7] Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación. (2016). *El Agro en Cifras*. Dirección de Planeamiento DIPLAN. p. 69.
- [8] Instituto Nacional de Estadística Guatemala. (2020). *Encuesta Nacional Agropecuaria con enfoque en granos básicos y cultivos permanentes Año agrícola 2019-2020*. Recuperado de: <https://www.ine.gov.gt/sistema/uploads/2021/01/22/20210122164213QDinUvuRa9GjopyXaTuNMXc3gd6j1Q1.pdf>
- [9] Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. (2013). *Estudio de las cadenas de valor maíz blanco y frijol en Centroamérica*. Recuperado de: <http://repiica.iica.int/docs/b3540e/b3540e.pdf>
- [10] Ramírez, P. S., Winkler, K., Monzón, R., Gauster, S., Dürr, J., y Ozaeta, J. P. (2010). *El potencial de tierras para la producción autosuficiente de maíz en Guatemala*. Recuperado de: https://www.academia.edu/6120943/El_potencial_de_tierras_para_la_producci%C3%B3n_autosuficiente_de_ma%C3%ADz_en_Guatemala
- [11] Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación. (2013). *Política de promoción del riego 2013-2023*. Recuperado de: https://www.maga.gov.gt/wp-content/uploads/pdf/home/politica_riego.pdf
- [12] Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícolas. (2018). *Registro del híbrido triple de maíz de grano blanco ICTA HB-17^{MA}*. Guatemala. ICTA. p. 24.
- [13] Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícolas. (2018). *Registro del híbrido de maíz de grano blanco ICTA HB-18^{OPM&Zn}*. Guatemala. ICTA. p. 26.
- [14] Escobedo, A. (2018). *Cadena de Valor de Maíz de Guatemala*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, (CATIE). Recuperado de: https://www.researchgate.net/profile/Adriana-Escobedo-Aguilar/publication/333433540_Cadena_de_valor_de_Maiz_de_Guatemala/links/5ced9d72299bf109da771ca4/Cadena-de-valor-de-Maiz-de-Guatemala.pdf
- [15] Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícolas. (2021). *Producción de semillas de granos básicos y hortalizas, Plan Operativo Anual 2021*. Guatemala. ICTA. p. 12.
- [16] Farrás, T. (2011). *Calidad de semilla: qué implica y cómo determinarla*. Instituto Nacional de Semillas. Laboratorio de calidad de semillas. Recuperado de: https://www.planagropecuario.org.uy/uploads/magazines/articles/180_2775.pdf
- [17] Galicia Vargas, E. A. (2011). *Fitomejoramiento participativo, evaluación y colección de materiales de maíz criollos en el Municipio de San Pedro Pinula, Jalapa, Guatemala, CA (Doctoral dissertation)*. Universidad de San Carlos de Guatemala. Recuperado de: <http://www.repositorio.usac.edu.gt/id/eprint/6842>
- [18] Espinosa, A., Sierra, M., y Gómez, N. (2003). Producción y tecnología de semillas mejoradas de maíz por el INIFAP en el escenario sin la PRONASE. *Agronomía mesoamericana*, 14(1), 117-121. doi: <http://doi.org/10.15517/AM.V14I1.11998>



- [19] Banco Mundial. (2022). *Gasto en investigación y desarrollo (% del PIB)-Guatemala*. Recuperado de: <https://datos.bancomundial.org/indicador/GB.xpd.RSDV.GD.ZS?end=2018&locations=GT&start=2005>
- [20] Banco Mundial. (2022). *Gasto en investigación y desarrollo (% del PIB)-Israel*. Recuperado de: <https://datos.bancomundial.org/indicador/GB.XPD.RSDV.GD.ZS?locations=IL>
- [21] Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícolas. (2018). *Registro del híbrido de maíz de grano ICTA grano de oro. Guatemala*. ICTA. p. 22
- [22] Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (2009). *Mapeo del mercado de semillas de maíz y frijol en Centroamérica*. Recuperado de: <http://repiica.iica.int/docs/B1897e/B1897e.pdf>
- [23] Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación. (2019). *Acuerdo ministerial 271-2019*. Recuperado de: <https://visar.maga.gob.gt/visar/2019/20/AM271-2019.pdf>
- [24] García, V. D. E. (2012). *Trabajo de graduación diagnóstico, evaluación agroeconómica de variedades de maíz (Zea mays L.) en asocio con frijol (Phaseolus vulgaris L.) y monocultivo y servicios realizados en San Pedro Jocopilas, El Quiché, Guatemala, CA (Doctoral dissertation)*. Universidad de San Carlos de Guatemala. Recuperado de: <http://www.repositorio.usac.edu.gt/6299/1/Documento%20de%20Graduaci%C3%B3n%20David%20Garc%C3%ADa.pdf>
- [25] Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. (2014). *Informe línea base*. Recuperado de: <https://www.catie.ac.cr/guatemala/attachments/article/18/informe-linea-base-2014.pdf>
- [26] Comunidades en Guatemala guardan la diversidad del maíz (2013, abril 25). *Biodiversidad Internacional*. Recuperado de: <https://www.biodiversityinternational.org/news/detail/comunidades-en-guatemala-guardan-la-diversidad-del-maiz/>

Situación actual y avances tecnológicos para mejorar la productividad del cultivo de maíz (*Zea mays* L.) en Colombia

Jose Jaime Tapia Coronado^{1*}, Liliana Margarita Atencio Solano¹, Julio Ramirez Duran¹, Karen Viviana Osorio Guerrero¹, Javier Castillo Sierra¹ Sergio Mejía Kerguelén¹

¹Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), Colombia

*Autor para correspondencia/Corresponding author, email: jtapia@agrosavia.co

Current situation and technological advances to improve the productivity of maize (*Zea mays* L.) in Colombia

Resumen

Los altos volúmenes de importación de maíz que se reportan anualmente para Colombia lo ubican en el séptimo lugar a nivel mundial en este ejercicio comercial, ocasionando alta dependencia de mercados internacionales que pueden alterarse fácilmente ante eventos globales como el sucedido por la pandemia a causa de la COVID 19 en el año 2020. La importancia del maíz como materia prima y alimento vital de la canasta familiar de los colombianos, justifica la realización de grandes esfuerzos normativos, políticos, institucionales y técnicos en búsqueda de aumentar de manera competitiva y sostenible las más de 393 000 hectáreas reportadas en 2019 y los rendimientos en los sistemas de producción tradicional y tecnificado que oscilan entre 2,3 t ha⁻¹ y 5,4 t ha⁻¹ respectivamente. Actualmente, en Colombia múltiples instituciones de carácter gremial, nacional e incluso internacional ofertan tecnologías que permiten contar con modelos productivos para los diversos contextos socioeconómicos existentes; sin embargo, encontrar nuevos desarrollos tecnológicos en el uso eficiente de recursos naturales para explotar las ventajas competitivas, además de nuevas ofertas de materiales de siembra tanto de variedades como de híbridos, han sido prioritarios para definir líneas de trabajo con el fin de atender demandas tecnológicas transversales del país. Asimismo, el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, como cabeza del sector agropecuario, lidera la formulación y ejecución de programas y/o proyectos que apalancan la integración de la cadena del maíz y su crecimiento o resurgimiento para disminuir las importaciones y lograr la autonomía de esta especie para Colombia.

Palabras clave: rendimiento, I+D+i, *Zea mays*, sostenibilidad, oferta tecnológica, manejo integrado, sistema tradicional.

Abstract

The high volumes of corn imports reported annually for Colombia place the country in seventh place worldwide in this business year, this produces high dependence on international markets that can be easily altered by global events such as occurred due to the COVID-19 pandemic in 2020. The importance of corn as a raw material and as a vital



Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /
Edited by:
Gabriela Albán

Recibido /
Received:
01/02/2022

Aceptado /
Accepted:
30/03/2022

Publicado en línea /
Published online:
16/05/2022



food for the Colombian family basket justifies great regulatory, political, institutional, and technical efforts to increase in a competitive and sustainable way the more than 393 000 hectares reported in 2019, and the yields in the traditional and technician production systems that range between 2,3 t ha⁻¹ and 5,4 t ha⁻¹ respectively. Currently, in Colombia multiple institutions of a trade union, national, and even international offer technologies that allow production models for the various socioeconomic contexts; however, finding new technological developments in terms of efficient use of natural resources to exploit, competitive advantages, and new offers of planting materials for both varieties and hybrids, have been a priority to define lines of work in order to meet cross-cutting technological demands of the country. Likewise, the Ministry of Agriculture and Rural Development, as head of the agricultural sector, leads the formulation and execution of programs and/or projects that leverage the integration of the corn chain and its growth or resurgence to reduce imports and achieve autonomy of this species for Colombia.

Keywords: I+D+i, *Zea mays*, sustainability, technological offer, integrated management, traditional system

CONTEXTO NACIONAL

En Colombia, el cultivo de maíz (*Zea mays* L.) es de mucha importancia principalmente en los renglones económico y social. Desde la dimensión social, es considerado un producto clave para el consumo humano, el cual aporta energía (9%) para la dieta alimenticia de las personas. Para el año 2020 el consumo per cápita fue de 39,4 kg con una reducción del 28% con respecto al 2010 [1]. Desde lo económico, contribuye con el 5% al PIB agropecuario y es un cultivo del cual dependen económicamente muchas familias (391 000) [2].

A nivel nacional el maíz se ubica en el tercer lugar por superficie de siembra después del café y el arroz [3], con un área de siembra de 393 381 ha, de las cuales el 71,5% (281 199 ha) corresponden a maíz amarillo, con un rendimiento de 3,9 t ha⁻¹ y una producción de 1 223 503 t y el restante 28,5% son de maíz blanco con un rendimiento de 3,8 t ha⁻¹ y una producción de 400 402 t. Este cultivo se lleva a cabo bajo dos sistemas de producción: el tecnificado y tradicional. El primero abarca el 57% (226.597 ha) del área total de maíz [1]. Las siembras son en monocultivos, en áreas superiores a 5 hectáreas, en terrenos con pendientes inferiores al 10%, de mediana a alta fertilidad, uso de maquinaria e implementos agrícolas, uso de genotipos mejorados, mayor acceso a insumos agrícolas y cuentan con asistencia técnica, lo cual permite la obtención de mayores rendimientos (5,4 t ha⁻¹) con respecto al sistema tradicional (2 t ha⁻¹). Para el sistema tradicional, predomina la economía campesina, caracterizada por tener mano de obra familiar, áreas menores a 5 ha, y suelos de baja fertilidad con baja mecanización. Además, usan variedades criollas con limitada utilización de híbridos. Los cultivos son establecidos bajo asocio con frijol, papa, haba, arveja y trigo para las zonas frías y yuca, café, cacao, plátano y frijol en zonas cálidas [2].

A pesar de las producciones, es el país con mayor volumen de importaciones en Suramérica y el séptimo en el mundo con 6 133 605 t, de las cuales 5 721 358 t



corresponden a maíz amarillo, provenientes de Estados Unidos (92,2%), Argentina (9,74%), Paraguay (0,56%) y Brasil (4,96%), donde sus destinos son principalmente Antioquia, Bogotá, Cundinamarca, Santander y Valle del Cauca, debido a la presencia de plantas procesadoras de alimentos balanceados para alimentación animal: aves, porcinos, vacunos y mascotas [1]. Otros usos de este maíz son el ensilaje y la producción de biocombustibles. En el caso de maíz blanco, se importan 393 464 t principalmente desde Estados Unidos [1,4], destinadas especialmente a Bogotá, Antioquia y Atlántico, para la transformación de subproductos para consumo humano.

SITUACIÓN QUE AFRONTA EL CULTIVO

El sector maicero en Colombia se caracteriza por su baja competitividad y productividad, comparado con otros países que cuentan con subsidios por parte del estado, convirtiéndolos en sistemas altamente competitivos. Esta condición conlleva a una gran afectación de este sector constituido principalmente por medianos y pequeños productores, ya que genera bajos ingresos económicos, que afectan la calidad de vida de los productores, quienes ven cada día menores posibilidades de progreso.

Con base en esta problemática, la cadena productiva de alimentos balanceados que integra este cultivo, ha identificado las demandas que reflejan las necesidades y factores que afronta el cultivo, las cuales han sido agrupadas en las siguientes áreas temáticas: I) manejo del sistema productivo, II) manejo de suelos y aguas, III) material de siembra y mejoramiento genético, IV) Calidad e inocuidad de insumos y productos, V) manejo sanitario y fitosanitario, VI) manejo cosecha, postcosecha y transformación, VII) sistemas de información, zonificación y georreferenciación, VIII) fisiología vegetal y nutrición, IX) manejo ambiental y sostenibilidad, X) transferencia de tecnología, asistencia técnica e innovación y XII) socioeconomía, mercadeo y desarrollo empresarial [5,6]. Esta cadena productiva ha priorizado tres demandas para el cultivo (Tabla 1) que aplican en todos los departamentos:

Tabla 1. Principales demandas del cultivo de maíz en Colombia.

Área temática	Demanda	Descripción
Material de siembra y mejoramiento genético	Desarrollo de nuevos cultivares con suficientes estudios de manejo agronómico y con aseguramiento en la disponibilidad de semilla certificada	<ul style="list-style-type: none"> Desarrollo de híbridos y variedades con alto potencial de rendimiento, adaptados a diferentes zonas agroecológicas y a la variabilidad climática, con resistencia a plagas y enfermedades y alta calidad nutricional e industrial. Conservación, caracterización y aprovechamiento de variedades locales y razas criollas.
Manejo sanitario y fitosanitario	Manejo integrado de plagas y enfermedades	<ul style="list-style-type: none"> Estudios de dinámica y establecimiento de umbrales para los principales problemas fitosanitarios Desarrollo de estrategias de vigilancia y manejo integrado de las principales plagas y enfermedades.



Área temática	Demanda	Descripción
Manejo de suelos y aguas	Nutrición y uso eficiente de nutrientes.	<ul style="list-style-type: none"> Desarrollo de estrategias para el aprovechamiento eficiente del agua Desarrollo de sistemas de labranza de conservación Usos de coberturas y sistemas de rotación Desarrollo de estrategias de nutrición y uso de biofertilizantes Uso de herramientas tecnológicas y software (AGRICULTURA DE PRECISIÓN)

Fuente: [5,6]

Alineación de las políticas públicas y las alianzas interinstitucionales como estrategia para resolver las demandas de la cadena del maíz

Pese a las dificultades que afronta el cultivo de maíz en Colombia, se han logrado identificar acciones de I+D+I (Investigación, Desarrollo e Innovación) y trabajos de articulación, que han permitido el desarrollo de avances tecnológicos que aportan a la consolidación de la productividad y sostenibilidad de la cadena maicera. Por lo anterior, es importante mencionar algunos programas, planes y esfuerzos de carácter nacional que se han planteado o que se vienen ejecutando, aportan a la coordinación y ejecución de acciones estratégicas, al ordenamiento de la cadena y a la priorización de esfuerzos desde el cumplimiento del mandato institucional al sector tanto público como privado.

Entre las más destacadas están el Plan de ordenamiento productivo (en construcción) desarrollado por la Unidad de Planificación Rural Agropecuaria – UPRA, entidad adscrita al Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural - MADR. La UPRA define como planteamiento inicial que los lineamientos de política para la cadena de maíz constituyen un instrumento orientador basado en cuatro ejes estructurales: mercado, productividad, bienestar e institucionalidad. Asimismo, contempla seis objetivos estratégicos: 1) impulsar la especialización de mercados en maíz; 2) fortalecer la investigación de semilla y su uso en los sistemas de producción; 3) dinamizar las agendas de investigación, desarrollo e innovación, la transferencia de tecnologías, capacitación y el extensionismo; 4) desarrollar la producción de maíz con capacidad de respuesta al cambio climático; 5) aumentar la participación del maíz con alto valor nutricional en la seguridad alimentaria; y 6) fortalecer la institucionalidad de la cadena de maíz. El propósito es que, para 2030, la cadena de maíz de Colombia sea una cadena productiva y rentable de manera sustentable; preserve su biodiversidad con un mejor uso de recursos, garantizando la seguridad alimentaria y nutricional del país [7].

La agricultura por contrato es una iniciativa del MADR que pretende lograr la articulación de diferentes eslabones de la cadena, desde productores, agroindustriales y, por supuesto, la institucionalidad relacionada con el sector maicero. Tiene como objetivos aumentar la producción nacional, asegurar la comercialización del producto con acuerdos formales de compraventa y generar una dinámica de ingresos y rentabilidad para el beneficio de pequeños y medianos productores [8]. Para el 2021, esta estrategia logró el desarrollo de 25 jornadas de negocios, vinculando a más de 240 000 productores en diferentes departamentos como Bolívar, Caquetá, Boyacá, Córdoba, Chocó, lo que representó cerca de \$1,6 billones (COP) en ventas directas [9]. Dentro de esta estrategia



se ha generado la iniciativa conocida como Soya-Maíz proyecto País, que pretende la reducción de importaciones de maíz y convertir a los productores nacionales en los principales proveedores de la industria de balanceados [10]. La iniciativa en ejecución parte del análisis de riesgo generado por la cuarentena mundial y del cierre de fronteras realizado por algunos países, lo que obligó a Colombia a repensar las necesidades y posibilidades del agro, logrando una propuesta que incluye el análisis actual de las cadenas, las áreas de producción, el potencial agrícola, la demanda asegurada y el contrato de suministro, además de una propuesta de instrumentos de financiación y gestión de riesgos agropecuarios con líneas y coberturas especiales para el maíz [10].

Otra de las iniciativas desarrolladas en Colombia es la Mesa Técnica Agroclimática, la cual es liderada por el MADR y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM) y en la que participan diferentes actores nacionales, regionales y locales, con el fin de conocer y entender el comportamiento de las condiciones climáticas en varias regiones del país y generar recomendaciones al sector agropecuario. En el caso de los cultivos, las recomendaciones van dirigidas a aquellos de mayor importancia económica para cada región, dentro de los cuales se resalta el maíz [11]. Este ejercicio participativo comparte información de tipo ambiental muy valiosa generando boletines agroclimáticos, los cuales quedan disponibles para los profesionales del agro, academia, extensionistas y productores en general [12]. Para el 2021, se contó con 84 boletines agroclimáticos en todo el territorio colombiano [13].

Por otra parte, se viene desarrollado el plan de trabajo sobre Lineamientos de política fitosanitaria e inocuidad en la cadena del maíz, liderado por FENALCE en convenio con MADR, ICA y AGROSAVIA. Con esto se busca ofrecer un marco de riesgo fitosanitario y de inocuidad para el sistema productivo de maíz que promueva la sostenibilidad (productivo, social, ambiental, económico) y mejore la competitividad del mismo.

Dentro de las alianzas más importantes para el desarrollo de procesos de investigación que permitan la generación de nuevas tecnologías para fortalecer el sistema productivo maíz en Colombia, se encuentra la alianza entre AGROSAVIA y el Centro de Mejoramiento de Maíz y Trigo – CIMMYT. Esta alianza estratégica de cooperación técnica genera iniciativas para contribuir a disminuir la brecha de rendimiento, el fortalecimiento de las capacidades técnicas y científicas, a partir de la adopción de nuevos cultivares superiores con adaptación a estreses bióticos y abióticos.

AVANCES TECNOLÓGICOS EN EL CULTIVO DE MAÍZ EN COLOMBIA

Material de siembra y mejoramiento genético

En Colombia se han realizado esfuerzos para el mejoramiento genético en maíz basado en las necesidades del productor y el consumidor [14], identificando genotipos superiores con atributos de valor para el beneficio de los productores. Una de las principales características de interés económico es encontrar materiales precoces con altos rendimientos. Entidades internacionales como CIMMYT y nacionales como AGROSAVIA y FENALCE, pretenden seleccionar, y desarrollar variedades mejoradas e híbridos de maíz, combinando factores ambientales, con eficiencia en el uso de agua



y nutrientes, calidad y propiedades deseables de producción de semillas para las zonas productoras de Colombia [3]. Con esto, se busca poner a disposición de los productores semilla calidad, que contribuya en la obtención de altos rendimientos, mayores ingresos y, por tanto, mayor rentabilidad [3].

Dentro del sistema de producción tecnificado es común el uso de materiales mejorados como híbridos convencionales y transgénicos que corresponden a las mayores áreas de siembra de maíz en Colombia [2]. La producción, distribución y comercialización de este tipo de semillas está a cargo de empresas nacionales e internacionales de carácter privado. Entre las de mayor importancia en Colombia se encuentran: FENALCE, Corteva (Unión de Dow y Dupont), Syngenta, Semillas Valle S.A., SEM LATAM S.A, entre otras [2]. En el sistema de producción tradicional se dispone del uso de semillas criollas y/o nativas y en muy poca proporción el uso de variedades mejoradas. Dentro de este último grupo, se comercializan variedades de maíz como: ICA V-109 (maíz de grano amarillo), ICA V-156 (maíz de grano blanco), ICA V- 305 e ICA V-508 (maíz de grano amarillo).

AGROSAVIA ha venido desarrollado nuevas variedades de maíz con diferentes atributos principalmente para pequeños y medianos agricultores (Tabla 2), las cuales son de alto rendimiento y adaptabilidad, además de que, los bajos costos de la semilla, permiten un oportuno y mayor acceso por parte de los agricultores [15].

Tabla 2. Principales características productivas de variedades de maíz de AGROSAVIA para la región Caribe Colombiana.

Nombre de la variedad	Color de grano	Elementos de valor	Adaptabilidad
CORPOICA V-114	Amarillo	RG: 4,3 t ha ⁻¹ , RF 30 t ha ⁻¹	Temperatura: 25-35°C, HR: 85%, Altura: 15-300 msnm, precipitación mínima: 400 mm
CORPOICA V-159	Blanco	RG: 4,4 t ha ⁻¹ , tolerancia a pudrición de mazorca	
CORPOICA V-115 dulce	Amarillo	RM: 5,3 t ha ⁻¹ , 17, 6 °Brix, mayor precio de venta de mazorcas	
AGROSAVIA V-116 Hawaii	Amarillo	RM: 3,9 t ha ⁻¹ , 17,9 °Brix, mayor precio de venta de mazorcas	
AGROSAVIA V-117	Amarillo	RG: 5,8 t ha ⁻¹ , RF: 30 t ha ⁻¹	
AGROSAVIA V-160 QPM	Blanco	RG: 5,2 t ha ⁻¹ y mayor contenido de Lisina y Triptófano	

RG: rendimiento de grano, RM: rendimiento de mazorcas en verde, RF: rendimiento de forraje verde, HR: humedad relativa.
Fuente: Elaboración propia

CORPOICA V-114 y CORPOICA V-159 son variedades de maíz con gran reconocimiento por parte de los pequeños productores de la región Caribe. Son genotipos adaptados a las microrregiones Valle Medio y Alto del río Sinú y sabanas colinadas de Córdoba, Sucre y Bolívar [15].

Asimismo, AGROSAVIA ha venido realizando trabajos en el Trópico Alto, donde se ha evaluado diferentes accesiones de maíces con fines forrajeros, provenientes del banco de germoplasma para la alimentación y la agricultura de Colombia (SBGAA),



considerando atributos como la precocidad, alta producción de biomasa y resistencia a plagas y enfermedades. Como resultados preliminares de trabajos realizados en el departamento de Cundinamarca entre los meses de marzo y agosto de 2020, a una altura de 2546 m s.n.m., precipitación promedio de 647 mm y temperatura promedio de 12,8°C, se encontraron genotipos con rendimientos de forraje de 33 t ha⁻¹ de MS, dos mazorcas por planta y una relación mazorca: biomasa de 28,34%, en el estado de grano lechoso a pastoso [16]. Estos resultados fueron obtenidos en áreas pequeñas, pero se busca continuar con las evaluaciones en áreas mayores y en otras localidades con la participación de productores.

En esta misma región, AGROSAVIA en alianza con CIMMYT, vienen desarrollando evaluaciones de 140 materiales de grano amarillo a fin de identificar cultivares con aspectos agronómicos sobresalientes y promisorios para el uso en fresco y grano que a futuro puedan ser entregados a los productores de esta zona del país. De acuerdo con los resultados preliminares de evaluaciones durante el 2021, se identificaron genotipos con rendimientos de grano de 7 t ha⁻¹ y rendimiento de mazorcas en estado de choclo mayor a 24 t ha⁻¹ con grados brix superiores a 14%, siendo notoriamente más precoces que el testigo local [17].

Manejo sanitario y fitosanitario

Entre las limitantes fitosanitarias reportadas por el ICA como las que más afectan el cultivo del maíz en Colombia están el gusano cogollero y el achaparramiento. En el caso del gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith)), es una plaga ampliamente distribuida en las zonas maiceras del país y del mundo, que presentan gran cantidad de hospederos alternos que favorecen el nivel de daño que causan. Su control, principalmente químico, comprende alrededor del 10% de los costos totales de producción del cultivo [18] por lo cual económicamente es considerado uno de los problemas más importantes [19]. Entre las alternativas para su control, está el uso genotipos transgénicos desarrollados por la empresa privada. Sin embargo, algunos estudios realizados en Tolima en genotipos que tienen incorporados la proteína Cry1F han mostrado que esta tecnología no ejerce un control total sobre la población larval de *S. frugiperda*, requiriendo de alternativas complementarias para su control [18].

Otro método para el control de esta plaga son los productos biológicos, principalmente a base de *Bacillus Turingiensis*, pero su uso ha sido poco adoptado por los productores. Díaz [20] evaluó diferentes cepas y dosis para el control biológico de esta plaga, encontrando valores de mortalidad superiores al 70% con dos tipos de cepas.

Por otro lado, el achaparramiento del maíz es un complejo transmitido por el insecto *Dalbulus maidis* (De Long y Wolcott), el cual fue reportado en el 2016 como plaga limitante en maíz, generando pérdidas mayores al 70% en el departamento del Huila. Posteriormente, en los años 2018 y 2019 esta plaga fue reportada en Tolima y Valle del Cauca, respectivamente. Con base a esta problemática, desde el 2019, La Alianza Bioversity-CIAT ha enfocado sus trabajos en el Valle del Cauca para generar recomendaciones de manejo de esta enfermedad que contribuyan al desarrollo sostenible. También ICA, Fenalce, Advanta, BioCrop y La Alianza Bioversity-CIAT han implementado algunas estrategias de monitoreo en este departamento como una herramienta esencial para



la toma de decisiones y prácticas de manejo [21]. Por otra parte, estudios desarrollados por AGROSAVIA en los departamentos de Huila y Tolima, han reportado la presencia de *Candidatus phytoplasma asteris* (MBSP) y *Spiroplasma kunkelii* (Mollicutes), transmitidos por *Dalbulus maidis*, como agentes causales de este complejo (Tabla 3), con una mayor presencia e infección de espiroplasma en comparación al fitoplasma [22]. Según Rico [23], sugieren que cada mollicute presenta una interacción específica con *D. maidis*. Asimismo, Sánchez [22], reporta cuatro morfotipos de *D. maidis* y la mayor abundancia de esta plaga en el municipio de Garzón (Huila), además del porcentaje de infección del 34% de *Spiroplasma kunkelii*, 15% de *Candidatus phytoplasma asteris* y 8% de infecciones mixtas dentro del vector. Mientras que Valencia [24] encontró que el 62,9% de las arvenses asociadas al maíz son de la familia Poaceae y pueden ser infectadas con mayor frecuencia por *Candidatus phytoplasma asteris* en zonas donde exista mayor abundancia del vector, lo cual representa un riesgo de transferencia desde la arvense al maíz.

Tabla 3. Abundancia de individuos de *Dalbulus maidis* en diferentes condiciones ambientales del departamento del Huila.

Clima	Altitud (msnm)	Temperatura (°C)	N° Individuos
Frío – húmedo	1060 - 1120	18 - 20	0
Templado-Semihúmedo	720-880	22-24	6470
Cáñido-Semiárido	360-585	26-28	252

Fuente: [22]

Debido a la problemática fitosanitaria detectada a través de visitas de inspección, vigilancia y control en predios de productores de maíz, el ICA ha reglamentado fechas límites de siembra en los departamentos de Córdoba, Cesar, Valle del Cauca, Tolima, Huila y Meta, como una medida de protección sanitaria [25].

Otras áreas temáticas

En el país, también se han realizado varios trabajos de investigación en otras áreas temáticas como: manejo integrado del cultivo, prácticas de conservación de suelos, densidades poblacionales y uso eficiente de fertilizantes, entre otras.

Una de las mayores preocupaciones del sistema productivo de maíz, es el uso indiscriminado de fertilizantes nitrogenados. Es así como Vergara y colaboradores [26] evaluaron el efecto de la fertilización nitrogenada sobre el rendimiento y la emisión de gases de efecto invernadero en lo Llanos Orientales (Figura 1) y evidenciaron que dosis intermedias ($60 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$), permiten un uso eficiente del nitrógeno, no obstante, las producciones fueron más bajas (31% en comparación a los tratamientos con mayores dosis); mientras que, mayores dosis de nitrógeno (120 y $240 \text{ Kg ha}^{-1} \text{ N}$) producen más grano, pero se obtienen más pérdidas de nitrógeno y emisiones de óxido nitroso (N_2O), lo que conlleva a mayores contaminaciones. Por lo cual se deben desarrollar nuevas tecnologías más sostenibles con el ambiente, las cuales permitan hacer un uso eficiente de fuentes de nitrógeno y regular las emisiones de gases [26].

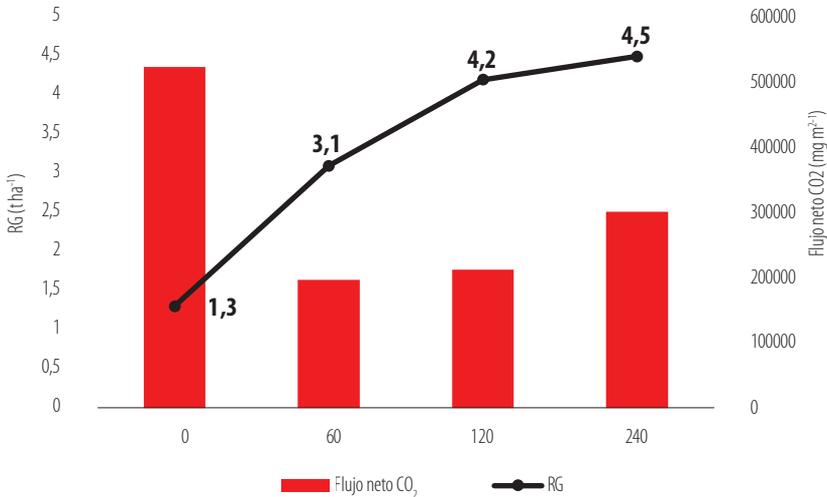


Figura 1. Efecto de la fertilización nitrogenada sobre el rendimiento y la emisión de gases de efecto invernadero en el cultivo del maíz. RG: rendimiento de grano, Fuente: [26].

Las altas densidades poblacionales son otra de las prácticas de manejo más usadas para incrementar el rendimiento del cultivo. De esta forma se genera una alta competencia intraespecífica por radiación solar, nutrientes y agua, se reduce la producción por planta, pero se incrementa el rendimiento del cultivo por el mayor número de plantas cosechadas. Bajo condiciones tropicales (Tolima), Quevedo [27], evaluó diferentes densidades poblacionales utilizando un híbrido comercial de maíz y encontraron que una densidad de 87 500 plantas ha⁻¹, permite un rendimiento de 9 916,66 ± 1,078 kg ha⁻¹ y una rentabilidad del 58%.

Otra práctica es el asocio de maíz con cultivos como yuca, ñame, frijol, café, cacao y plátano, la cual es bastante realizada en la región Caribe de Colombia [28]. Para la cual AGROSAVIA [29] ha generado recomendaciones técnicas para la producción de maíz en asocio con yuca, uno de los cultivos que más se siembran en la zona, generando mayores beneficios para los agricultores que se reflejan en incrementos de los rendimientos de hasta un 50% y reducción de los costos unitarios de hasta un 36% con respecto a la forma tradicional de producción. Estos asocios también han sido de gran importancia para la producción de forraje en la alimentación animal. Mejía [30] evaluó la productividad y calidad del forraje del maíz intercalado con sorgo dulce y frijol, indicando que los mayores rendimientos (por encima de 80 t ha⁻¹) se obtuvieron en los asocios maíz-sorgo y maíz-sorgo-frijol, lo que representa una alternativa de alimentación animal, principalmente para la época seca.

Un factor que ha cobrado gran importancia en el sector agropecuario es el fortalecimiento de capacidades de los productores, promoviendo la asociatividad. Especialmente, para el maíz, AGROSAVIA desarrolla la apuesta de cooperación interinstitucional en alianza con ICA y SENA denominada Plan Nacional de Semillas, que tiene como propósito



el fortalecimiento de las capacidades de organizaciones de productores del cultivo de maíz en diferentes regiones de Colombia. De esta manera se busca capacitar a las organizaciones en tres componentes: organizacional, financiero y productivo. Los anteriores, bajo el enfoque de producción de semilla de calidad, es decir, orientado a recuperar, conservar y mejorar el uso de recursos fitogenéticos con y para pequeños productores mediante la limpieza, multiplicación, escalamiento, provisión de materiales regionales; y el fortalecimiento de las capacidades locales de las organizaciones de productores, que contribuya a consolidarlas como núcleos productivos de semilla de calidad. A través de esta estrategia se han capacitado 19 organizaciones de productores de los departamentos de Antioquia (1), Bolívar (3), Cauca (7), Córdoba (2), Risaralda (1), Sucre (6) y Valle del Cauca (1).

AGRADECIMIENTOS

A la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA) por apoyar y financiar la elaboración del presente manuscrito que se enmarca en el proyecto “Programa de Mejoramiento Genético del Cultivo de Maíz para Colombia” (Código del proyecto: 1001498) en alianza con el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT). 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 XXIV Reunión Latinoamericana del Maíz por apoyar constantemente la temática del presente artículo.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Julio Ramírez diseño las temáticas iniciales, Jose Tapia y Liliana Atencio realizaron modificaciones a las temáticas iniciales. Julio Ramírez y Karen Osorio realizaron los aportes en la temática de alienación de políticas públicas y alianzas. Jose Tapia y Liliana realizaron los aportes en las temáticas de contexto nacional, situación del cultivo y avances tecnológicos del cultivo. Karen Osorio y Javier Castillo realizaron los aportes en resultados de investigación de maíz en trópico alto. Sergio Mejía aportó en la mejora de la redacción y actualización de información del manuscrito. Jose Tapia, Liliana Atencio y Karen Osorio aportaron en la edición final del documento según las recomendaciones de la revista ACI. Todos los autores contribuyeron a la búsqueda de información y redacción y puesta a punto de todo el documento.

CONFLICTO DE INTERÉS

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



REFERENCIAS

- [1] Federación Nacional de Cultivadores de Leguminosas, Cereales y Soya “FENALCE”. (2020). Estadísticas. Recuperado de <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrjoiMTAwM2FmNDAtY2JmOS00ZDM1LWE2MTMtYTM5YTU4NGM2YTg1IiwidCI6IjU2MmQ1YjJLTBmMzEtNDdmOC1zTk4LTmMj4Nzc4MDBhOCJ9>
- [2] García, M. (2021). Cadenas sostenibles ante un clima cambiante. El maíz en Colombia. Bonn (Germany): Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). 98 p. ISBN: 978-958-8945-53-8
- [3] Figueroa, E., & Aguilar, A. (2019). Maíz para Colombia Visión 2030. Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT); Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). México. 109 p. doi: <https://hdl.handle.net/10883/20218>
- [4] Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR). (2020). Maíz. Dirección de Cadenas Agrícolas y Forestales. Recuperado de <https://sioc.minagricultura.gov.co/AlimentosBalanceados/Documentos/2020-09-30%20Cifras%20Sectoriales%20Ma%3%ADz.pdf>
- [5] Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación (Colciencias)., Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural & Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria “Corpoica”. (2016). PECTIA - Plan Estratégico de Ciencia, Tecnología e Innovación del Sector Agropecuario Colombiano. (2017-2027). 161 p. Recuperado de https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/12759/109429_67478.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [6] Siembra. (2018). Listado detalles demandas Cadena de alimentos balanceados Recuperado de <http://www.siembra.co/Demandas/Demanda/DetalleContenido>
- [7] Unidad de Planificación Rural Agropecuaria “UPRA”. (2020). Plan de ordenamiento productivo, plan de acción para la cadena de maíz “por la productividad y competitividad de la cadena, y el bienestar de la población colombiana (2020-2030). Bogotá D.C. Colombia. Recuperado de https://www.upra.gov.co/documents/10184/124468/20200813_PPT_POP_Cadena_Maiz.pdf/09b96be9-7d18-4eb6-b44b-975c97fb6f29
- [8] Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural “MADR”. (2019). Coseche y venta a la fija – agricultura por contrato. Estrategia Sectorial de comercialización agropecuaria que compromete a todas las Entidades Nacionales, Territoriales, Industria y Gremios Agropecuarios con la venta segura de los productos del Agro. Bogotá Colombia. Recuperado de <https://sioc.minagricultura.gov.co/Documentos/1.%20Documento%20de%20Pol%3%ADtica%20Coseche%20y%20Venta%20a%20la%20Fija%202019.pdf>
- [9] Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR). (2022). Agricultura por Contrato’ cierra el 2021 con 242.000 productores vinculados y ventas por \$1,6 billones. Recuperado de [https://www.minagricultura.gov.co/noticias/Paginas/%E2%80%98Agricultura-por-Contrato%E2%80%99-cierra-el-2021-con-242-000-productores-vinculados-y-ventas-por-\\$1,6-billones.aspx#:~:text=Bogot%C3%A11%2C%204%20de%20enero%20de,por%20el%20presidente%20lv%C3%A1n%20Duque.](https://www.minagricultura.gov.co/noticias/Paginas/%E2%80%98Agricultura-por-Contrato%E2%80%99-cierra-el-2021-con-242-000-productores-vinculados-y-ventas-por-$1,6-billones.aspx#:~:text=Bogot%C3%A11%2C%204%20de%20enero%20de,por%20el%20presidente%20lv%C3%A1n%20Duque.)
- [10] Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural “MADR”. (2021). Soya - Maíz: Proyecto País. Recuperado de <https://fenalce.co/documentos-de-interes/>
- [11] FINAGRO. (2021). Boletín agroclimático nacional. Recuperado de <https://www.finagro.com.co/boletines-agroclim%C3%A1ticos-nacionales-2021>
- [12] Gobernación del Huila. (2021). Mesa técnica Agroclimática comprometida con el agro huilense. Recuperado de <https://www.huila.gov.co/publicaciones/11358/mesa-tecnica-agroclimatica-comprometida-con-el-agro-huilense/>
- [13] Fondo para el Financiamiento del Sector Agropecuario (FINAGRO). (2021). Boletines agroclimáticos nacionales 2021. Recuperado de <https://www.finagro.com.co/boletines-agroclim%C3%A1ticos-nacionales-2021>
- [14] Pardey, C. (2015). Producción de semilla y cruzamientos entre accesiones de maíz del departamento del Magdalena, Colombia. Acta Agronómica. 64 (1): 83-92. doi: <http://dx.doi.org/10.15446/acag.v64n1.44551>
- [15] Mejía Kerguelén, S. L., Atencio Solano, L. M., Tapia Coronado, J. J., & Sánchez Rodríguez, L. A. (2020). Corpoica V-114 y Corpoica V-159: variedades de maíz de alta producción para la región Caribe de Colombia. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - AGROSAVIA. doi: <https://doi.org/10.21930/agrosavia.brochure.7404142>
- [16] Castillo, J., Mancipe, E., Vargas, J., Mayorga, F., & Avellaneda, Y. (2021). Evaluación agronómica de maíces del banco de germoplasma de Agrosavia. Revista colombiana de ciencias pecuarias. 34(4).



- [17] Osorio, K., Florez, D., Jimenez, P & Mejía, S. (2021). Evaluación preliminar de híbridos promisorios de maíz (*Zea mays* L.) de grano amarillo de alto rendimiento para el trópico alto en la zona andina colombiana. Datos sin publicar.
- [18] Jaramillo Barrios, C., Varón Devia, E. H., & Monje Andrade, B. (2020). Economic injury level and action thresholds for *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae) in maize crops. *Revista Facultad Nacional Agronomía Medellín* 73(1): 9065-9076. doi: <https://doi.org/10.15446/rfnam.v73n1.78824>
- [19] Gómez Valderrama, J. A., Guevara Agudelo, E. J., Barrera Cubillos, G. P., Cotes Prado, A. M., & Villamizar Rivero, L.F. (2010). Aislamiento, identificación y caracterización de nucleopoliedrovirus nativos de *Spodoptera frugiperda* en Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 63(2): 5511-5520.
- [20] Diaz, J. (2016). Acción de cepas nativas de *Bacillus thuringiensis* (Berliner), como control biológico de *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith). *Lepidoptera: Noctuidae. TEMAS AGRARIOS*. Vol 21 (2):86-91.
- [21] Rodríguez, J. (2021). *Dalbulus maidis* (De Long & Wolcott) vector del complejo del Achaparramiento del maíz. 41-47. En: Quintero Rivero, E. J.; Jaramillo Barrios, C. I., & Canal Daza, N.A. (Comp.). (2021). *Memorias Congreso Sociedad Colombiana de Entomología. 48 Congreso SOCOLEN. Congreso virtual. Sociedad Colombiana de Entomología. 1, 2 y 3 de septiembre de 2021, Ibagué, Tolima, Colombia.* 228 p
- [22] Sánchez, I; Ramírez Godoy, A., Monje Andrade, B., & Vargas Berdugo, A. M. (2021). MIP-0-15. Evaluación de una población de *Dalbulus maidis* (Hemiptera: Cicadellidae) y la frecuencia de los patógenos del achaparramiento del maíz en el Huila. Pág 76. En: Quintero Rivero, E. J.; Jaramillo Barrios, C. I.; Canal Daza, N.A. (Comp.). 2021. *Memorias Congreso Sociedad Colombiana de Entomología. 48 Congreso SOCOLEN. Congreso virtual. Sociedad Colombiana de Entomología. 1, 2 y 3 de septiembre de 2021, Ibagué, Tolima, Colombia.* 228 p
- [23] Rico Sierra, E.M., Jaramillo Barrios, C.I., Monje Andrade, B., & Vargas Berdugo, A. M. (2021). MIP-0-24. Presencia de Mollicutes en *Dalbulus maidis* DeLong y Wolcott (Hemiptera: Cicadellidae) asociados al achaparramiento del maíz en el Tolima y Huila. Pág. 79. En: Quintero Rivero, E. J.; Jaramillo Barrios, C. I.; Canal Daza, N.A. (Comp.). 2021. *Memorias Congreso Sociedad Colombiana de Entomología. 48 Congreso SOCOLEN. Congreso virtual. Sociedad Colombiana de Entomología. 1, 2 y 3 de septiembre de 2021, Ibagué, Tolima, Colombia.* 228 p
- [24] Valencia Rodríguez, V., Rico Sierra, E., Jaramillo Barrios, C., Monje Andrade, B., & Vargas Berdugo, A.M. (2021). MIP-P-29. Interacción de *Dalbulus maidis* (De Long & Wolcott) (Hemiptera: Cicadellidae), arvenses y mollicutes causantes del achaparramiento del maíz en los departamentos de Tolima y Huila. Pág. 114. En: Quintero Rivero, E. J.; Jaramillo Barrios, C. I.; Canal Daza, N.A. (Comp.). 2021. *Memorias Congreso Sociedad Colombiana de Entomología. 48 Congreso SOCOLEN. Congreso virtual. Sociedad Colombiana de Entomología. 1, 2 y 3 de septiembre de 2021, Ibagué, Tolima, Colombia.* 228
- [25] Instituto Colombiano Agropecuario "ICA". (2021). Resoluciones gerencias seccionales. Recuperado de <https://www.ica.gov.co/normatividad/normas-ica/resoluciones-seccionales>
- [26] Vergara Rodríguez, D. R., Diaz Rodríguez, G., & Alvarez, A. P. (2017). Efecto de la fertilización Nitrogenada en el cultivo de maíz para la caracterización de la emisión de gases efecto invernadero. *Documentos De Trabajo ECAPMA*, (2). doi <https://doi.org/10.22490/ECAPMA.1822>
- [27] Quevedo, Y., Beltrán, J., & Barragán, E. (2018). Effect of sowing density on yield and profitability of a hybrid corn under tropical conditions. *Revista Agronomía Colombiana*. 36 (3): 248-256. doi: <https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v36n3.71268>
- [28] Salgar, L. (2004). El cultivo de maíz en Colombia. *Revista Semillas*. 22/23, 2-7.
- [29] Agrosavia (n/f). Recomendaciones técnicas para el manejo integrado del cultivo de yuca en el sistema de producción en asocio con maíz. Recuperado de <https://www.agrosavia.co/productos-y-servicios/oferta-tecnol%C3%B3gica/617-recomendaciones-de-manejo-de-yuca-en-asocio-con-ma%C3%ADz>
- [30] Mejía, S., Tapia, J., Atencio, L., & Cadena, J. (2019). Producción y calidad nutricional del forraje del sorgo dulce en monocultivo e intercalado con maíz y frijol. *Pastos y Forrajes* 42 (2): 133-142.

Tecnologías disponibles para incrementar la producción de maíz en Perú

Luis A. Narro León¹, Alexander Chávez Cabrera^{2*}, Teófilo W. Jara Calvo², Teodoro P. Narro León², Alicia E. Medina Hoyos², Isaac Cieza Ruiz², Percy Díaz Chuquisuta², Roberto Alvarado Rodríguez², Fernando Escobal Valencia²

¹ Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú

² Instituto Nacional de Innovación Agraria, Lima Perú

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

Technologies available to increase corn production in Perú

Resumen

La superficie de maíz sembrada en Perú es de 500 000 ha, de esta, aproximadamente el 50 % es de maíz amarillo duro (MAD) y el otro 50% de maíz amiláceo (MAM) o andino (MAN). El MAD es utilizado por la industria de alimentos para animales y el MAN para consumo humano. La superficie media sembrada por los agricultores es inferior a 1,5 ha en ambos casos. La producción de maíz se ha incrementado en los últimos 60 años, sin embargo, no se ha satisfecho la demanda de MAD, que se cubre con la importación de más de 3 millones de toneladas de maíz por año, por un valor de mil millones de dólares. Entre tanto, existe un 5% de excedente de MAN para exportación. Las importaciones de MAD superan el 70% de la demanda, lo que significa un problema para la seguridad alimentaria nacional; por otro lado, hay más de 500 000 unidades agrícolas sembradas con maíz y, por lo tanto, necesitan ser incluidas en las políticas de desarrollo del país para que los agricultores mejoren sus medios de vida. Una forma de incrementar los ingresos de los agricultores que siembran MAN, es la vinculación al mercado nacional e internacional con el fin de incrementar la demanda mediante la producción de productos transformados a base de maíz como materia prima, el incremento en las exportaciones de maíz morado en los últimos años es un buen indicador. Para MAD se necesita una estrategia que incluya a todos los miembros de la cadena del maíz, públicos y privados, con el objetivo de aumentar la producción de maíz de acuerdo con los requisitos nacionales, regionales y locales. En ambos casos, las tecnologías adecuadas y las políticas gubernamentales son fundamentales para aumentar la productividad y la rentabilidad del maíz. Se debe desarrollar una estrategia de capacitación para el éxito del plan peruano de maíz destinado a aumentar la producción de maíz.

Palabras clave: Productividad, fitomejoramiento, maíz andino, maíz amarillo duro.

Abstract

The maize area planted in Peru is 500,000 ha, of this, approximately 50% of each one, hard yellow maize (MAD) and Andean maize (MAN); MAD is used by the animal feed industry and the MAN for human consumption. The average area planted by farmers



Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /
Edited by:
Gabriela Albán

Recibido /
Received:
12/07/2021

Aceptado /
Accepted:
02/03/2022

Publicado en línea /
Published online:
16/05/2022



is less than 1.5 ha in both cases. Maize production has been increased in the last 60 years however the demand has not been satisfied for MAD, which has been covered by importing more than 3 million tons of corn per year, worth one billion dollars. Meanwhile, exist a 5% surplus of MAN for export. MAD imports is higher than 70% of the demand, which means a problem for national food security; on the other hand, there are more than 500,000 farming units that are planting maize and therefore need to be included in country development policies to improve their livelihoods. A way to increase income for farmers planting MAN is linking to the national and international market in order to increase the demand by producing transformed products based on corn as raw material, the increase in purple corn exports in recent years is a good indicator. For MAD a strategy to increase maize production is needed that may include all public and private members of the maize chain aimed to increase maize production according with national, regional, and local requirements. In both cases, suitable technologies and government policies are essential to increase maize productivity and profitability. A training strategy must be developed for succeeding the maize Peruvian plan aimed to increase maize production.

Keywords: Andean corn, maize, plant breeding, productivity.

INTRODUCCIÓN

La investigación de maíz en el Perú se inició a principios de la década de 1930 con pruebas agronómicas realizadas por la Estación Experimental Agrícola La Molina – EEALM [1]. Los trabajos en mejoramiento de maíz realizados por la EEALM, tuvieron como meta el desarrollo de híbridos simples y dobles de maíz amarillo duro (MAD), utilizando líneas con alto grado de homocigosis ($> S_c$) [2,3]. En 1938, se inician en la EEALM los primeros trabajos de autofecundación de 38 variedades procedentes de valles maiceros peruanos, con la finalidad de obtener híbridos de rendimiento superior al de las variedades existentes [2]. En 1942 se dispuso de 48 líneas autofecundadas que se utilizó para formar topcrosses, utilizando a la variedad Arizona como probador (cruzamiento de cada línea por el probador). En la evaluación de topcrosses, 6 de éstos tuvieron un rendimiento entre 113 y 139% más que la variedad testigo ‘amarillo corriente’. En 1943 se formó híbridos simples con las 6 mejores líneas seleccionadas de la evaluación de topcrosses y se evaluó estos híbridos utilizando la variedad Colombiano Fumagalli como testigo; los resultados mostraron que dos híbridos rindieron 6.6 t/ha (32% superior al testigo). Estos 2 híbridos fueron nominados como LM # 1 y LM # 2. El híbrido LM # 2 fue distribuido a los agricultores a partir de 1949. Ensayos realizados en 1949 mostraron que un nuevo híbrido, LM # 3, tenía mayor potencial de rendimiento que LM # 2 [4].

En la misma década de 1940, a través de la Estación Experimental Tingo María de la Dirección de Colonización del Ministerio de Agricultura [5], se importó las variedades de maíz PD (MS4), PD (MS6), PD (MS9) que fueron difundidas ampliamente en la Selva peruana; estas variedades posteriormente dieron origen a la variedad Cubano Amarillo. Otras variedades importantes en esa época fueron Colombiano Fumagalli, Amarillo La Molina o Amarillo Diminich; esta última típica de la raza Perla [6]. En el año 1953 se crea



el Programa Cooperativo de Investigaciones en Maíz (PCIM) con base en un convenio entre la Escuela Nacional de Agricultura y el Programa Cooperativo de Investigación Agropecuaria (PCA). El PCIM nació con la visión de incrementar la productividad del maíz en cada una de las regiones del Perú [7]. Una de sus metas fue formar una masa crítica con jóvenes profesionales capaces de solucionar los problemas de la investigación agrícola, trabajando en equipo en un programa específico de investigación por objetivos [6]. El PCIM determinó el grupo heterótico Cuba x Perla como la combinación híbrida de mayor rendimiento y heterosis para la costa peruana. Perla es una raza local de Perú y Cuba es germoplasma de origen cubano [8]. Se liberó híbridos comerciales de MAD que fueron sembrados en gran parte de la costa peruana. Se debe destacar el establecimiento del Banco de Germoplasma de Maíz en la Universidad Nacional Agraria, que incluye 3 931 accesiones [9] agrupadas en 52 razas [7,9,10,11,12].

La creación de la Asociación de Productores de Semilla Certificada de Maíz (APOSECEM), fue impulsada por el PCIM como una institución público privada, y a través de esta entidad se produjo semilla para cubrir gran parte de la superficie sembrada con maíz en la costa peruana particularmente en la década de 1970; en 1974 el 94% del área sembrada en la costa fue con híbridos liberados por el PCIM [13].

El Programa Nacional de Maíz (PNM) del Instituto Nacional de Investigación y Promoción Agropecuaria (INIPA) fue creado el año 1983 como un esfuerzo integrado de investigación, promoción y capacitación en maíz con la finalidad de incrementar la producción de MAD en la selva, valles interandinos bajos y costa norte; y en MAN generar nueva tecnología y transferir la tecnología existente, [14]. La liberación de la variedad Marginal 28 Tropical en 1985 y de híbridos de MAD para la costa en los años 2000 fue un paso importante para el incremento de la producción de maíz. Desafortunadamente, la producción de semilla sigue siendo un cuello de botella importante para la difusión de semilla mejorada. Tanto el PCIM como el Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA) han generado tecnologías para MAN de la zona andina alta de Perú. Se ha estudiado las colecciones nativas o locales, se han desarrollado compuestos raciales y variedades comerciales, se han desarrollado tecnologías agronómicas para el incremento de la productividad.

EL MAÍZ EN EL PERÚ

Superficie

El maíz es el cultivo de mayor superficie sembrado en el Perú, con 450 000 ha actualmente; de éstas, cerca del 60% corresponde a MAD. Para 1961, la superficie sembrada con maíz fue de 253 000 ha; es decir en 60 años ésta casi se ha duplicado. La superficie sembrada con MAD ha tenido un crecimiento significativo ya que pasó de 90 000 ha en 1961 a 236 000 ha en 2020; en el caso de MAN el crecimiento ha sido modesto, pasando de 164 000 a 198 000 ha para el mismo período de tiempo. Se puede concluir que el área sembrada con maíz ha tenido un incremento significativo en los últimos 60 años, principalmente por el incremento de superficie de MAD. Actualmente, la superficie sembrada con MAD es mayor que la superficie sembrada con MAN (Fig. 1). El maíz en el Perú es un cultivo de agricultura familiar ya que para el caso de MAD se tiene 198 563 unidades agropecuarias que siembran



maíz con un promedio de superficie por unidad agropecuaria de 1.3 ha. Para el caso de MAN la superficie sembrada por agricultor es aún menor; por lo tanto, la tecnología y decisiones de política para el maíz deben estar enmarcadas en estas consideraciones.

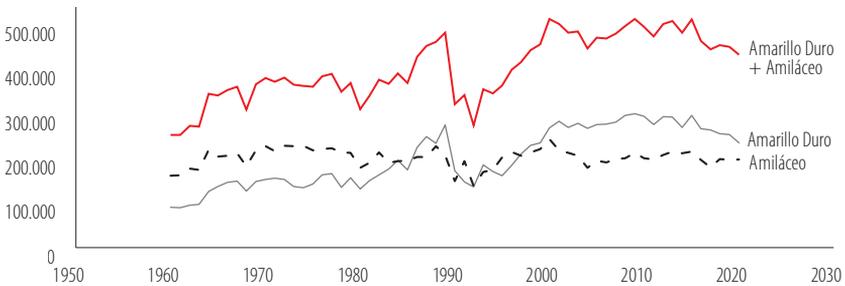


FIGURA 1. Superficie sembrada con maíz en el Perú (ha)

El MAD se cultiva principalmente en la costa y la selva del país, donde las condiciones de clima y suelo son muy diferentes. La costa mayormente presenta un clima cálido o templado, con bajas precipitaciones. En los valles irrigados, donde se siembra MAD, predominan los suelos fértiles de alta calidad por los sedimentos minerales depositados por los 53 ríos que bajan de la sierra. Las temperaturas mensuales máximas se dan en febrero (entre 24 °C y 33 °C) y las mínimas en julio (entre 15 °C y 18 °C).

La selva se puede dividir en selva alta o ceja de selva (entre 500 y 2200 m s. n. m.), con clima subtropical y templado, y temperatura que fluctúa entre 22 °C y 26 °C, con abundantes lluvias (2600 a 4000 mm/año); y selva baja (debajo de 500 m s. n. m.) con temperaturas de 35 °C y lluvias superiores a 1000 mm/año. La selva alta posee un relieve escarpado con algunos valles donde se siembra MAD. Es una zona con fuerte meteorización o descomposición del material parental y de reacción ácida. Predominan los suelos arcillosos profundos, de tonalidad amarilla y rojiza, ácidos y de buen drenaje. En la selva baja predominan los suelos ácidos de baja fertilidad; en esta zona el MAD se produce en restingas y suelos de altura en condiciones de secano favorecido (bajo temporal). La producción en restinga tiene ventajas comparativas sobre la producción en suelos de altura, principalmente, por su mayor fertilidad natural, [17,18].

El MAN, aunque puede ser cultivado hasta los 3 800 m de altura, predomina en la Región Quechua, una de las 8 regiones naturales en las que se divide el territorio peruano, y que se ubica entre 2300 y 3500 m s. n. m. a ambos lados de los Andes peruanos, con clima templado y temperatura que oscila entre 10 °C y 20 °C. La zona posee un relieve de gran pendiente y muy agreste, en la cual predominan los suelos superficiales, y a la vez valles interandinos altos y en zonas intermedias, donde hay diversos tipos de suelos principalmente los de textura media, alcalinos y de color rojizo o pardo rojizo, algunos son arcillosos, así como suelos profundos y de textura fina. En este espacio geográfico se encuentra la mayor superficie de MAN, que se desarrolla bajo condiciones de secano con precipitaciones entre 300 y 900 mm/año, expuesto muchas veces a veranillos prolongados, lluvias poco frecuentes y bajas temperaturas, [17,18].



Producción

La producción de maíz en Perú durante los últimos 60 años ha tenido una tendencia creciente, aunque no suficiente como para satisfacer la demanda; en 1961, la producción de maíz de 340 000 t y en 2020 de 1 570 000 t; es decir casi se quintuplicó. Se observa diferencias en el incremento de la producción de MAD y de MAN; para el mismo período de tiempo, la producción de MAD fue de 187 000 t y de 1 265 000 t, mientras que para MAN fue de 148 000 t y 304 000 t, respectivamente. Es decir, la producción de MAD se incrementó casi 7 veces (no solo por el incremento en superficie sino también por el empleo de semillas mejoradas de híbridos), mientras que para MAN solo se duplicó (por el empleo de variedades mejoradas de polinización libre). La mayor producción de MAD ha sido consecuencia tanto del incremento en superficie sembrada como de los mayores rendimientos obtenidos, el rendimiento promedio en 1961 fue de 2.1 t/ha y de 4.9 t/ha en 2020. Los incrementos tanto de superficie sembrada como de rendimiento han sido menores para MAN, el rendimiento pasó de 0.9 t/ha a 1.8 t/ha para este período de tiempo. Se concluye que el mayor incremento de la producción de maíz en el Perú ha sido debido al mayor incremento de la producción de MAD y al incremento del área sembrada (Fig. 2).

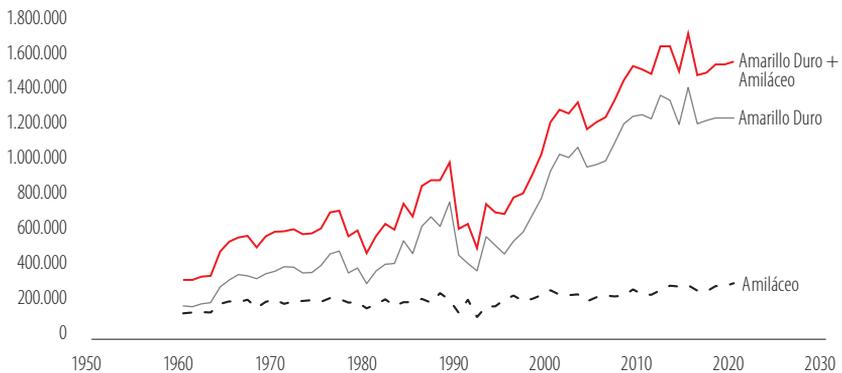


FIGURA 2. Producción de maíz en el Perú (t)

Demanda

La demanda de MAD en el Perú ha tenido un crecimiento acelerado durante los últimos 60 años, pasando de 361 000 t en 1961 a 5 255 000 t en 2019 [15]; es decir un crecimiento de 13 veces. La demanda de MAN ha sido básicamente para consumo interno, ya que de las 304 000 t producidas en 2018 se ha exportado menos del 5%.

El Perú era autosuficiente en MAD hasta 1974. De 1975 a 1990 la cantidad de MAD importado pasó de 236 000 t a 479 000 t que equivale a un crecimiento promedio del 69% del maíz importado con respecto al maíz producido en el país; de 1991 a 2009 la cantidad de MAD importado pasó de 492 000 t a 1 510 000 t que equivale a un crecimiento promedio del 127%; de 2010 a 2019 la cantidad de MAD importado pasó de 1 917 000 t a 3 983 000 t que equivale a un crecimiento promedio del 206% (Fig. 3).



Es decir, en casi 50 años la importación de MAD se ha multiplicado por 17 y este es un aspecto que debe ser considerado en los lineamientos de política agraria.

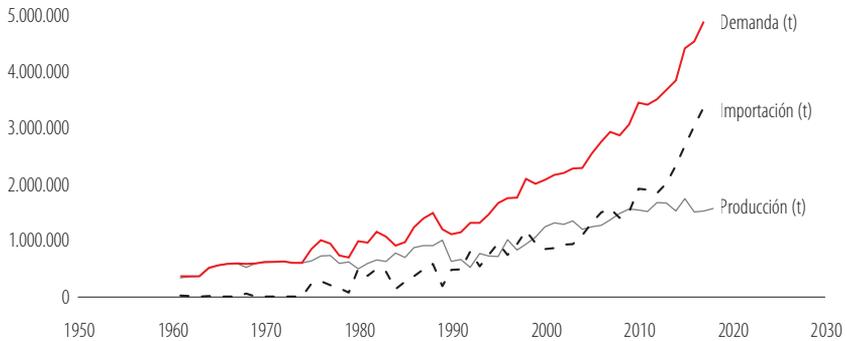


FIGURA 3. Demanda de maíz en el Perú (t)

Demanda de MAD y consumo de carne de pollo

El crecimiento del consumo de carne de pollo en el Perú ha determinado un incremento en la demanda de MAD (Fig. 4). Hasta los primeros años de la década de 1960, el consumo *per cápita* de pollo fue alrededor de 3 kg; las políticas de esa época orientadas al incremento de consumo de carne de pollo y menor consumo de carnes rojas determinaron que entre 1975 y 1990 el consumo *per cápita* sea superior a 10 kg. El crecimiento del consumo *per cápita* de carne de pollo fue muy significativo de 1991 a 2009 llegando a 34 kg y más aún en los últimos años donde se reporta un consumo *per cápita* cercano a los 50 kg y en algunas regiones como Lima, superior a 60 kg (Fig. 5).

En los ítems siguientes se desarrollará con mayor detalle alguno de los puntos antes mencionados con la finalidad de proporcionar mayor información para el lector interesado.

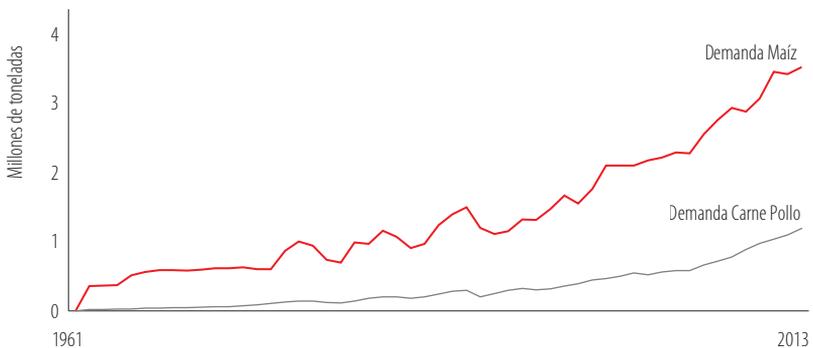


FIGURA 4. Demanda de maíz y de carne de pollo en el Perú

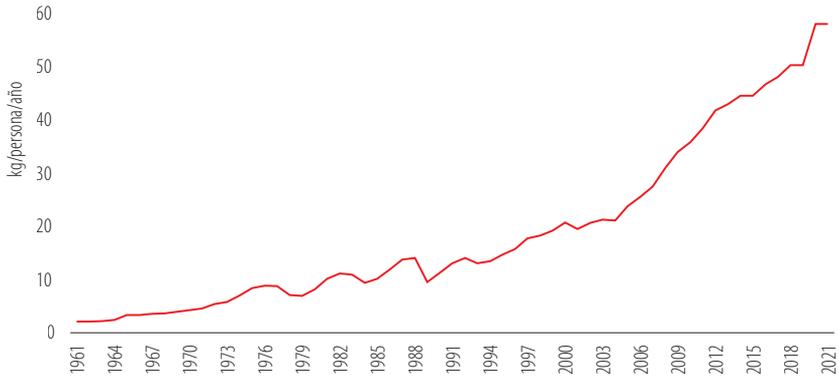


FIGURA 5. Consumo *per cápita* de carne de pollo en el Perú

TECNOLOGÍAS DISPONIBLES Y SU ADOPCIÓN

Maíz amiláceo (MAM) o maíz andino (MAN)

El Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego de Perú declaró el día 05 de mayo de cada año como “Día nacional del maíz morado, maíz choclo y maíces para cancha” [19]. Se espera que la norma permita revalorar y posicionar al maíz amiláceo como un producto andino, milenario, de consumo popular saludable con potencial agroexportador, lo cual permita promover la realización de festivales, concursos, celebraciones, ferias y encuentros alusivos a la fecha, a nivel nacional, regional y local, a fin de dinamizar la economía nacional, así como fortalecer su posicionamiento comercial a nivel nacional e internacional.

Existen fortalezas y oportunidades para hacer más rentable al maíz amiláceo en el país, como: la existencia de variedades mejoradas con alto potencial productivo (Tabla 1); el rendimiento promedio se incrementó en 400 kg/ha respecto al año 2015 [16]; tendencia al alza en los precios a nivel nacional e internacional (el maíz blanco peruano es mejor cotizado en el país norteamericano (US\$ 2.79) que en España, donde recibe un precio de US\$ 1.75 el kilogramo, y el precio por tonelada de choclo subió de 560 soles en 2007 a 1172 soles en 2017, [16, 20]; amplia diversidad del maíz amiláceo que se adaptan a condiciones agroclimáticas especiales; existencia de metodologías participativas para la producción de semilla local comunitaria de calidad, permitiendo la producción y mejora del potencial productivo de las 52 razas locales existentes [9]; conocimiento ancestral y vocación productiva; existencia de tecnología para incrementar la productividad; amplísima posibilidad de incorporar los productos del maíz amiláceo a la canasta exportadora; posibilidades de ampliar su integración comercial a los mercados de los pequeños productores de la agricultura familiar e incrementar el consumo.



TABLA 1. Variedades de maíz amiláceo inscritas en el Registro de Cultivares Comerciales que conduce la Autoridad en Semillas, a enero de 2021.

Cultivar	Solicitante	Obtendor	Fecha	Ámbito
Blanco Urubamba (PMV-560)	DRA Cusco		27-Jun-83	Sierra media
Kulli (morado) PMV-581	DRA Cusco		27-Jun-83	Costa y sierra; baja y media
San Gerónimo (PMV-662)	DRA Huánuco		28-Oct-83	sierra alta
Choclero 101	INIPA	INIPA * (EEA Baños del Inca)	7-Mar-85	Sierra
Canchero 401	INIPA	INIPA * (EEA Baños del Inca)	7-Mar-85	Sierra media
Morocho 501	INIPA	INIPA * (EEA Baños del Inca)	7-Mar-85	Sierra
PMS 265 (Pardo Dulce)	UNALM	PCIM UNALM	20-May-85	Costa central (verano)
PMV 271 (Pardo)	UNALM	PCIM UNALM	20-May-85	Costa central (invierno)
PMV 272 (Pardo B.U.)	UNALM	PCIM UNALM	20-May-85	Costa central (invierno)
PMS 261 (Chancayano)	UNALM	PCIM UNALM	20-May-85	Costa central (verano)
PMC 561 (Choclero Tardío)	UNALM	PCIM UNALM	20-May-85	Sierra media
PMC 584 (Choclero)	UNALM	PCIM UNALM	20-May-85	Sierra media y alta
PMS 636 (Choclero Precoz)	UNALM	PCIM UNALM	20-May-85	Sierra alta
PMT 637 (Choclero Precoz)	UNALM	PCIM UNALM	20-May-85	Sierra alta
PMC 638 (Tolerante al frío)	UNALM	PCIM UNALM	20-May-85	Sierra alta
PMS 266 (Opaco Amarillo)	UNALM	PCIM UNALM	20-May-85	Costa central; sierra baja
PMS 267 (Opaco Tropical)	UNALM	PCIM UNALM	20-May-85	Costa (verano); selva alta
PMV 580 (Opaco Mal Paso/Huascarán)	UNALM	PCIM UNALM	20-May-85	Sierra media y baja
INIA 601	INIA	INIA † (EEA Baños del Inca)	29-Mar-00	Sierra norte
INIA 603 Choclero	INIA	INIA † (EEA Baños del Inca)	21-Ago-01	Cajamarca
INIA 604 Morocho	INIA	INIA † (EEA Baños del Inca)	25-Abr-03	Cajamarca, Cajabamba, Chota
INIA 606 Choclero Prolífico	INIA	INIA † (EEA Santa Ana)	26-Mar-04	Sierra central



Cultivar	Solicitante	Obtendor	Fecha	Ámbito
INIA 607 Ch'ecche Andenes	INIA	INIA † (EEA Andenes)	11-Oct-05	Sierra sur
INIA 615 Negro Canaan	INIA	INIA § (EEA Canaan)	10-Ene-08	Huanta (Ayacucho), Huamanga (Ayacucho)
INIA 614 Paccho	INIA	INIA § EEA Baños del Inca	11-Ene-08	Cajamarca, La Libertad, Piura
INIA 618 Blanco Quispicanchi	INIA	INIA § EEA Andenes	9-Ago-12	Quispicanchi (Huaró, Andahuaylillas, Quiquijana, Urcos).
INIA 620 Wari	INIA	INIA § EEA Canaan	1-Mar-13	Ayacucho y Apurímac
INIA 621 Pillpe	INIA	INIA § EEA Canaan	20-May-13	Ayacucho y Apurímac
INIA 622 Chullpi Sara	INIA	INIA § EEA Andenes	2-Jul-19	Sierra sur: Cusco (Quispicanchis, Huaró Andahuaylillas, Quiquijana, Urcos)
INIA 623 Cumbemaño	INIA	INIA § EEA Baños del Inca	10-Dic-19	Sierra norte: Cajamarca

* Instituto Nacional de Investigación y Promoción Agropecuaria. † Instituto Nacional de Investigación Agraria. ‡ Instituto Nacional de Investigación y Extensión Agraria. § Instituto Nacional de Innovación Agraria.
Fuente: [16, 35]

Aun cuando hay la tendencia para incrementar el rendimiento de maíz amiláceo, en el lapso de nueve años el promedio nacional sólo avanzó en 8.9%, [16]. A pesar de este panorama, existe la posibilidad de que el agricultor de la sierra pueda incrementar sus ingresos al cosechar en estado temprano su producto y venderlo como “choclo” o intensificar la siembra de maíces especiales como el morado, por el alto precio que estos alcanzan actualmente en los mercados de la costa. Las ventajas que tienen estos dos productos son el dulzor y sabor, y el alto contenido de antocianina en la tusa y pancas o brácteas, respectivamente, [16, 21]. Mientras el precio en chacra por tonelada de choclo subió en 109% en 10 años (de 560 soles en el año 2007 a 1 172 soles en 2017), la producción sólo se incrementó en 8% (de 8.0 en 2007 a 8.7 t/ha en 2017). Esta es una alternativa que debe ser aprovechada, al igual que la producción de maíz Chulpi por su grano dulce para cancha, Cusco Cristalino Amarillo por su alto contenido de almidón para harina y la elaboración de un insuflado de maíz consumido como snack denominado “maná, chichasara blanca o cocoliche” (“pisankalla o pororó” en Bolivia), [16].

Actualmente, existe creciente demanda nacional e internacional de productos de las razas Cusco Gigante por su tamaño de grano y calidad de choclo (Fig. 6). Desde el año 2000 las exportaciones de este maíz han crecido considerablemente, pasaron de 3.8 millones de dólares a 21.7 millones de dólares en 2012. En 2017 crecieron 6% frente a 2016. En 2017 se exportó por un valor FOB de 11.4 millones de dólares mientras que en 2016 ese valor fue de 10.7 millones de dólares, [22, 23]. El precio también se incrementó, pasó de 1.57 a 1.99 dólares el kg. No obstante, esta raza está circunscrita a un área reducida en la región de Cusco de aproximadamente 8 500 hectáreas (la zona se ubica exclusivamente en el Valle del Urubamba o Valle Sagrado de los Incas, en el departamento y región Cusco, provincias Calca y Urubamba, a una altitud entre 2750



y 2950 m s.n.m., en ambas márgenes del río Vilcanota), y, puesto que se ha convertido en un commodity, existe un sistema más o menos formal de producción de semilla, sin garantizar su calidad, [22].

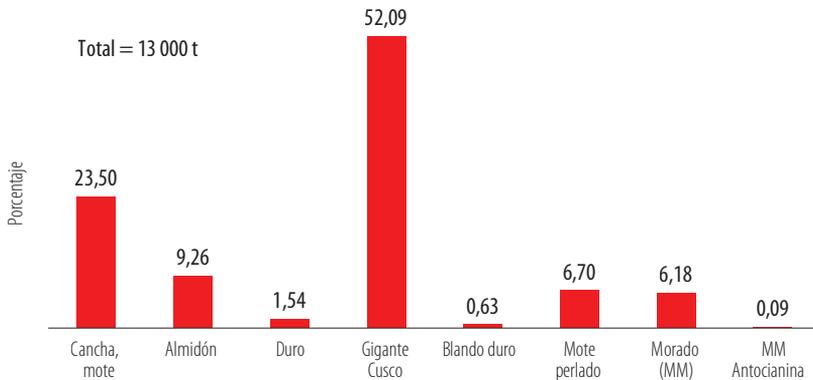


FIGURA 6. Exportación de maíz amiláceo peruano en 2019

Mejoramiento genético

Durante 1958 el PCIM desarrolló y registró oficialmente 12 cultivares, desde variedades de polinización libre (VPL) hasta sintéticos y compuestos, mientras que -desde esa fecha- el INIA ha desarrollado hasta el momento 15 cultivares [24], todos debidamente inscritos en el Registro de Cultivares Comerciales que conduce la Autoridad en Semillas (Tabla 1). Casi todos los cultivares del INIA han sido desarrollados bajo el sistema de selección recurrente de medios hermanos a partir de los Complejos Peruanos (CP), que se formaron uniendo en una misma población las semillas del mismo grupo de maíz de acuerdo a su uso (chocleros, cancheros, morochos y maíces especiales – morado y dulce o paccho) y período vegetativo (precoces, tardíos) y con adaptación a una altitud de 2300 a 3100 m s.n.m., [16]. En la formación de los complejos se incluyó tanto germoplasma peruano como proveniente del Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) y otros programas de maíz de Latinoamérica. Todos los cultivares tienen un potencial de rendimiento que supera ampliamente a los cultivares de los agricultores, principalmente en la sierra y sirven de base para la generación de variedades experimentales, [16].

Con relación a la generación de variedades experimentales, y con el éxito logrado en la difusión de la variedad INIA 601 después de casi veinte años de su lanzamiento como variedad comercial, en la Estación Experimental Agraria (EEA) Baños del Inca – Cajamarca, se ha iniciado un programa de generación de líneas endogámicas derivadas de la “Población Negro” mejorada (formada por 108 progenies de la variedad Morado de Caraz y 148 progenies de la variedad local Negro de Parubamba), de la cual se extrajo INIA 601, [21]. El objetivo es identificar grupos heteróticos con la finalidad de desarrollar híbridos y sintéticos de alto rendimiento y alta cantidad de antocianina de buena calidad (actualmente se tiene un sintético y un grupo de híbridos experimentales en evaluación). Para el caso de maíces chocleros en la EEA Santa Ana – Junín, se está generando líneas



para formar patrones heteróticos orientados a la producción de híbridos. En la EEA Andenes – Cusco, se desarrolla un subproyecto para obtener progenies de hermanos completos en una población de maíz de valles interandinos altos. El trabajo se hace en coordinación con la Universidad Carolina del Norte – USA. El objetivo de este programa es estudiar las posibles diferencias genéticas y fisiológicas que puedan existir entre las distintas poblaciones de valles altos de Mesoamérica y Sudamérica.

Se han evaluado maíces de alta calidad de proteína (QPM, de las siglas en inglés) provenientes del CIMMYT [24], caracterizados por tener el doble de lisina y triptófano que los maíces normales. Del compuesto J se derivó la variedad Opaco Huascarán que ha tenido éxito en la producción de maíz para forraje en el centro y sur del país, además es resistente a 'pukaponcho' producido por un micoplasma, espiroplasma. La formación de compuestos raciales es la estrategia utilizada por el PCIM de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM) para conservar *in situ* la diversidad del maíz en el Perú [24].

La tolerancia al frío es una característica adaptativa importante en los maíces de sierra alta, el PCIM de la UNALM ha utilizado métodos de selección recurrente para obtener ganancias por este atributo; se determinó que la variancia aditiva fue la que más contribuyó a la variación en el rendimiento y otros caracteres agronómicos y morfológicos [24]. Para tolerancia al frío en los primeros estados de desarrollo del cultivo, los efectos maternos son importante [24].

Agronomía

Los maíces amiláceos se siembran generalmente en condiciones de secano (sin riego) en la sierra de Perú hasta altitudes de 3950 m s.n.m. entre los meses de julio y noviembre, dependiendo de la región y del ciclo vegetativo de la variedad y de las precipitaciones pluviales [16]. El nivel de tecnología utilizado es bajo por la pobreza, las condiciones geomorfológicas y medioambientales en la región que determina riesgo para el cultivo [25]. En el libro 'Cincuenta años del Programa Cooperativo de Investigaciones en Maíz', [26] y en el 'Manual de Producción de Maíz Amiláceo' de INIA, [16], se encuentran detalladas las recomendaciones agronómicas para el cultivo de maíz amiláceo; con esta información y los aportes de los colegas dedicados a esta actividad principalmente en INIA, se puede resumir los siguientes puntos:

- El sistema de siembra más prevalente es el tradicional denominado "a cola de buey" por el uso de tracción animal. El sistema semi mecanizado o mecanizado se realiza cuando la topografía del terreno y las condiciones socioeconómicas del productor lo permiten. Hay pruebas iniciales de labranza de conservación con resultados preliminares exitosos.
- La cantidad de semilla utilizada para la siembra (kg/ha) depende del tamaño de semilla de la variedad y del tipo de consumo del grano de maíz. Para maíz dulce (paccho) se necesita 25 kg/ha, para morochos 35 kg/ha, para cancheros y negro de 35 a 60 kg/ha, y para chocheros de 80 a 120 kg/ha, [16]. El número de plantas/ha más utilizado es de 50 000, que se consigue con distancia entre surcos de 0.80 m, distancia entre golpes o sitios de 0.50 m y con 2 plantas/golpe. También se recomienda una distancia entre surcos de 0.85 m y de 0.40 m entre golpes, de



acuerdo a la variedad y el sistema de cultivo, de tal forma que el número de plantas/ha oscila entre 40 000 y 62 000. En sistema a 'cola de buey' se debe sembrar de 6 a 8 semillas por metro lineal, [16].

- La fertilización del cultivo de maíz se debe hacer considerando que para producir una tonelada de grano se requiere de 30 a 35 kg de N, 10 a 13 kg de P_2O_5 y 40 a 45 kg de K_2O . La fertilización de P_2O_5 y K_2O debe ser a la siembra y el N se debe fraccionar. El fraccionamiento de N se realiza con el criterio de incrementar su eficiencia de utilización por la planta; en tal sentido, la aplicación se realiza en los momentos de mayor demanda que está en función al número de hojas de la planta, y se debe determinar para cada variedad y ambientes específicos; fraccionamiento de N en dos oportunidades entre la siembra y antes de la floración es recomendable. Hay que considerar también tapar el fertilizante aplicado (por ejemplo, urea) para evitar pérdidas, ya sea por percolación y contaminación de aguas subterráneas, o por evaporación y sus efectos negativos a la atmósfera. Se debe considerar también la fertilización con micronutrientes de acuerdo al análisis de suelo y plan de cultivo [16].
- El control del gusano mazorquero (*Helicoverpa zea*) es efectivo aplicando aceite antes que la larva ingrese al choclo. Se debe aplicar una a dos gotas de aceite con un gotero o esponja, en forma dirigida a los estigmas cuando estos tienen 2 a 3 cm de longitud. Para tener un buen control se debe realizar dos a tres aplicaciones, ya que en un cultivo de maíz no todos los estigmas aparecen al mismo tiempo [16, 27].

Uso de semilla mejorada de maíz amiláceo (MAM) o maíz andino (MAN)

En la sierra del Perú el rendimiento promedio de maíz amiláceo es de 1.81 t/ha [16], que necesariamente debe ser incrementado. Una de las causas de esta baja productividad es la baja tasa de uso de semilla de calidad que no supera el 1%.

Muchos agricultores aún no le dan la importancia a la semilla producida bajo el sistema formal, proveniente de semilleros inscritos ante la Autoridad en Semillas y cultivados para tal fin. No practican el aislamiento de otros campos de maíz aún de la misma variedad y no respetan la extensión mínima que deben tener los semilleros. Casi todo el Valle Sagrado de los Incas se siembra en un solo mes del año el maíz Blanco Gigante Cusco y escapar a esta época ocasiona problemas de productividad. La mayor parte de los productores cree que su semilla es la mejor, y esto hace que prescindan de semilla certificada. En el valle es poco difundido el uso de semilla producida en semilleros de instituciones públicas como el INIA [22].

Esta situación permite inferir que en el resto de la sierra del país ocurre lo mismo, pero en mayor grado. Hay diversas causas para que esto ocurra.

En principio, la única institución que se dedica a producir semilla certificada de sus variedades mejoradas es el INIA, pero desde hace varios años no ejecuta un plan de difusión de las variedades luego de su lanzamiento o liberación. La adopción de una nueva tecnología sin difusión adecuada es imposible. El fenómeno actual de la variedad de maíz morado INIA 601 lo demuestra. Esta variedad fue lanzada al mercado el año 2000 y recién, luego de 20 años, se la empieza a conocer gracias al agresivo programa



de difusión que viene desarrollando la EEA Baños del Inca en Cajamarca [21, 28]. Por consiguiente, la solución simple es que el área de Transferencia de Tecnología de las EEA del INIA promocionen a gran escala (espacio y tiempo) las nuevas variedades luego de su lanzamiento. Esto está ligado a disponibilidad presupuestal para desarrollar una red de parcelas demostrativas por lo menos en la primera campaña.

Los canales de comercialización de la semilla no son los más adecuados. Se debe establecer puntos de venta de semilla en los departamentos y provincias más productoras del cultivo. En el diagnóstico de línea de base del Proyecto 2361771 del INIA -Proyecto de Semillas-, un alto porcentaje de productores manifestaron que no saben dónde adquirir las semillas del INIA, (A. Chávez, datos sin publicar).

Existen causas externas ligadas a las anteriores que complican el panorama, como la debilidad en el servicio de extensión. Los agricultores desconocen las ventajas comparativas de las variedades mejoradas y poseen un limitado conocimiento de las ventajas de usar semilla de calidad. Por consiguiente, se debe organizar un servicio de extensión con activa participación de los gobiernos locales o municipalidades, porque estos tienen representatividad en las zonas más alejadas del país y tienen la posibilidad de contratar al menos un profesional en ciencias agrarias para hacer extensión.

Hay causas socioeconómicas que limitan el incremento de la tasa de uso de semilla de calidad, como la limitada capacidad adquisitiva de los agricultores, los escasos nexos con el mercado y la siembra mayoritariamente para autoconsumo en parcelas pequeñas, (A. Chávez, datos sin publicar). Se debe tomar decisiones políticas para priorizar acciones en la cadena productiva del maíz a nivel de agencias agrarias, gobiernos locales y gobiernos regionales, promocionar el consumo del maíz en gran escala (ferias, catálogos, recetarios, redes sociales), generar alguna estrategia de asociatividad para fortalecer las organizaciones de productores que permitan elevar los estándares de calidad en los productos con valor agregado como mote, cancha, harinas, extractos, colorantes y otros, o dar a conocer la demanda de mercados étnicos externos. La asociatividad permitiría la adopción de buenas prácticas agrícolas, la promoción y conservación de la biodiversidad, el acceso al crédito por parte de los agricultores, además de mitigar las diversas amenazas generadas por el cambio climático (heladas, granizadas, veranillos o sequías) y el incremento de plagas y enfermedades debido a ciclos ininterrumpidos de siembras de maíz.

Transferencia de tecnología

El maíz amiláceo en Perú se dedica básicamente al consumo interno, de las 300 000 t producidas anualmente, menos del 5% se dedica a la exportación (Fig. 5). El año 2019 se exportó 13 000 t de maíz amiláceo de las cuales el 52% correspondió al tipo Gigante del Cusco, seguido por maíz para cancha (23.5%), almidón (9.3%), mote perlado (6.7%), maíz morado (6.2%). Por lo tanto, es un reto incrementar la cantidad de maíz dedicada tanto a la exportación como al mayor consumo interno. La estrategia debe ser incrementar los rendimientos cuyo promedio nacional es de 1.81 t/ha [16] y desarrollar mecanismos que permitan vincular a los productores con el mercado.

Un ejemplo a tener en cuenta en esta actividad es la promoción de la variedad de maíz morado INIA 601. Ésta posee un alto contenido de antocianinas en la tusa o coronta (6.34%),



la panca o bráctea (4.12%) y el grano (0.56%) [20], y se está utilizando en la agroindustria para la obtención de colorantes naturales y de esta manera se está vinculando a los productores con el mercado nacional e internacional para la producción de fitoquímicos (antocianinas), [21]. En el proceso de comercialización de maíz morado las pancas o brácteas y tusas o corontas, secas y picadas, se utilizan para la extracción de antocianinas mientras que los granos sirven para elaborar harinas, galletas, postres, etc. [28]. Los granos son también el insumo para la fabricación del primer Whisky de grano de maíz morado en el mundo.

Modelo de transferencia de tecnología

La vinculación de las diversas instituciones públicas y privadas interesadas en el desarrollo agropecuario de Cajamarca, como el Gobierno Regional de Cajamarca y los Gobiernos Locales de diversas provincias de la región (Bambamarca, Cajamarca, Celendín, Chota, Contumazá, Hualgayoc, San Marcos y San Miguel) así como el apoyo de la Cooperación Técnica Internacional como Agencia de Cooperación Internacional de Japón - JICA, han permitido desarrollar una estrategia de promoción del cultivo de maíz INIA 601. Estas actividades incluyen campos demostrativos, organización de productores, participación en ferias a nivel regional y nacional, y participación en eventos internacionales. En estos eventos se comparte material de capacitación y difusión del proceso productivo del maíz morado y su comercialización.

Por otro lado, el interés de la prensa local, nacional e internacional, jugaron un rol importante en la difusión y transferencia de tecnología del maíz morado. Esto ha determinado que iniciativas empresariales nacionales e internacionales, estén promoviendo diversos productos agroindustriales que utilizan como materia prima al maíz morado, [21, 28].

Todas estas actividades y emprendimientos están determinando un crecimiento en las exportaciones de maíz morado a países como España, Estados Unidos, Japón, Ecuador, Bélgica, Países Bajos, Canadá Chile y Portugal. Las exportaciones de maíz morado tuvieron un comportamiento inestable desde el año 2000 en que se exportó 811 t, en 2002 se exportó 235 t, luego en 2004 no hubo exportaciones, en 2005 se exportó 137 t y en 2006, 169 t. Durante el año 2020, se exportó 6 755 t de maíz morado por un valor FOB de US\$ 12.550.179. [29].

A pesar de tener muchas fortalezas y oportunidades, el maíz morado peruano aún es poco conocido, no existe estandarización de calidad en su cosecha, la oferta exportadora sigue siendo baja y no cuenta con recursos tecnológicos. Adicionalmente, las industrias farmacéuticas son muy rigurosas en la certificación fitosanitaria, existen limitadas normas técnicas del gobierno para mejorar la competitividad de las empresas. La competencia puede lograr una reducción de precios y mejorar la calidad de su maíz en mediano plazo u ofertar productos sustitutos de colorantes naturales, las exportaciones equivalen menos del 2% del consumo interno. La cadena de valor no está integrada, por lo que muchas empresas son incapaces de responder rápida y creativamente (hay poca experiencia y especialización en el negocio).



MAÍZ AMARILLO DURO (MAD)

Mejoramiento genético

La demanda de MAD en el Perú es de 5.3 millones de toneladas [14], de las cuales el 77% requiere ser importado, no obstante haber tenido en los últimos 60 años un crecimiento sostenido de la producción nacional tanto por el incremento de áreas de cultivo, como el mayor rendimiento obtenido por los productores. La mayor demanda es debida al incremento del consumo *per cápita* de carne de pollo, principalmente, que es superior a los 50.4 kg [15].

El mayor rendimiento que se obtiene en campos de los productores es consecuencia del uso de variedades mejoradas e híbridos. El uso de híbridos de maíz en el Perú data desde 1949, cuando La Estación Experimental La Molina liberó el híbrido LM #2 [4]. La creación del Programa Cooperativo de Investigación en Maíz (PCIM) de la UNALM dinamizó la generación de híbridos y la producción de semilla híbrida que determinó un crecimiento significativo en la producción de maíz a tal punto que para hasta los primeros años de la década de 1970 el Perú fue autosuficiente en la producción de MAD.

Los métodos de mejoramiento utilizados para la generación de cultivares (variedades e híbridos) incluyen introducción de germoplasma, selección masal y selección recurrente. La introducción de germoplasma se hizo desde inicios de la formación del programa de mejoramiento hasta la actualidad. Se indica algunos hitos importantes:

- Introducción de germoplasma centroamericano que posteriormente dio origen a Cubano Amarillo ampliamente difundido en la selva peruana y que fue uno de los componentes del grupo heterótico Cuba x Perla, [30]. Perla es germoplasma peruano.
- Introducción de variedades experimentales del CIMMYT para probar su adaptación y eventual liberación. Por ejemplo, la variedad Marginal 28 Tropical fue liberada combinando 3 variedades experimentales de la población 28 del CIMMYT; actualmente, esta variedad es la más difundida en la selva peruana, también se siembra en valles interandinos tanto de la cuenca oriental como occidental de la cordillera de los Andes. Otras variedades como PMV 748 y PMV 749 también fueron derivadas de variedades experimentales del CIMMYT de las poblaciones 27 y 28, respectivamente [30].
- Introducción de líneas endocriadas para ser utilizadas en programas de mejoramiento o en la formación de híbridos experimentales para posterior liberación por el programa nacional. En el primer caso se puede mencionar la introducción de 113 líneas del CIMMYT por el PCIM, con las que se inició un programa de Selección Recíproca Recurrente [31]. En el segundo caso se debe mencionar la introducción de líneas progenitoras de híbridos superiores identificadas por el Programa de Maíz de INIA, por ejemplo, los progenitores de los híbridos simples INIA 605 (amarillo normal) e INIA 611 (de alta calidad de proteína). Otro uso de las líneas del CIMMYT ha sido la formación de nuevas combinaciones híbridas como es el caso del híbrido INIA 619.



- Selección masal como un método rápido para mejorar caracteres cualitativos de colecciones con buen potencial de rendimiento como el caso de PMV-9 [31].
- Selección recurrente de medios hermanos para la preservación de germoplasma local como Alazán y Mochero [30].
- Selección Recíproca Recurrente (SRR) para el desarrollo de híbridos del grupo heterótico Perla × Cuba utilizando los sintéticos PMS 263 (Cuba) y PMS 264 (Cuba). Los productos de este esquema de mejoramiento fueron híbridos dobles formados por líneas S₁ tales como PM-203, PM-204, PM-205, PM-206, PM-207, etc. (Tabla 2). Igualmente, se utilizó el método de SRR con germoplasma del CIMMYT y del PCIM como integrantes de otro grupo heterótico.

TABLA 2. Cultivares desarrollados por el INIA y el PCIM desde 1985.

CULTIVAR	OBTENTOR	FECHA	TIPO	ADAPTACIÓN
Marginal 28T	INIPA ¹	7/03/1985	VPL	Selva y costa norte
Pimte INIA	INIA ⁴ EEA El Porvenir	13/07/1998	Híbrido triple	Selva y costa
INIA 602	INIA ⁴ EEA El Porvenir	16/02/2001	VPL	Suelos ácidos de selva con saturación de Al < a 60% y en suelos normales de costa y selva.
INIA 605	CIMMYT / INIEA ⁶	9/01/2004	Híbrido simple	Trópico bajo de la costa del Perú.
INIA 608 Porvenir	INIEA ⁶ EEA El Porvenir	18/08/2006	Híbrido Inter varietal	Selva de Tarapoto y Yurimaguas
INIA 611 Nutri Perú	INIEA ⁶	3/04/2007	Híbrido simple QPM	Costa y selva
INIA 609 Naylamp	INIEA ⁶ EEA Vista Florida	3/04/2007	Híbrido triple	Costa norte
INIA 610 Nutrimaíz	INIA ⁴ EEA El Porvenir	5/11/2007	VPL	Costa norte y selva
INIA 612 Maselba	INIA ⁴ EEA San Roque	14/11/2007	VPL	Selva baja
INIA 616 Ucayali	INIA ⁵ EEA Pucallpa	5/03/2010	VPL	Suelos de restinga de selva baja
INIA 617 Chuska	INIA ⁶ EEA Vista Florida	29/11/2010	Sintético	Costa y selva
INIA 619 Megahíbrido	INIA ⁵ EEA Vista Florida	10/10/2012	Híbrido simple	Costa y selva
INIA 626 Akira	INIA ⁵ EEA Donoso	1/12/2021	Híbrido simple	Costa central
PM-201	PCI UNALM	20/05/1985	Híbrido doble	Costa
PM-203	PCI UNALM	20/05/1985	Híbrido doble	Costa
PM-204	PCI UNALM	20/05/1985	Híbrido doble	Costa
PM-205	PCI UNALM	20/05/1985	Híbrido doble	Costa
PM-206	PCI UNALM	20/05/1985	Híbrido doble	Costa
PM-211	PCI UNALM	20/05/1985	Híbrido doble	Costa
PM-212	PCI UNALM	20/05/1985	Híbrido doble	Costa



CULTIVAR	OBTENTOR	FECHA	TIPO	ADAPTACIÓN
PM-213	PCI UNALM	20/05/1985	Híbrido doble	Costa
PMS-263	PCI UNALM	20/05/1985	Sintético	Costa
PMS-264	PCI UNALM	20/05/1985	Sintético	Costa
PM-301	PCI UNALM	20/05/1985	Híbrido doble	Costa
PM-701	PCI UNALM	20/05/1985	Híbrido doble	Costa norte y selva
PM-702	PCI UNALM	20/05/1985	Híbrido doble	Costa norte y selva
PMC-747	PCI UNALM	20/05/1985	Compuesto	Costa
PMV-748	PCI UNALM	20/05/1985	VPL	Costa
PMV-749	PCI UNALM	20/05/1985	VPL	Costa
PMV-750	PCI UNALM	20/05/1985	VPL	Costa
PMC-2	PCI UNALM	20/05/1985	Compuesto	Costa
PMC-6	PCI UNALM	20/05/1985	Compuesto	Costa
PM-102	PCI UNALM	20/05/1985	Híbrido inter familiar	Costa norte y selva
PMC-861	PCI UNALM	20/05/1985	Compuesto	Costa
PMC-863	PCI UNALM	20/05/1985	Compuesto	Costa norte y selva
PMC-864	PCI UNALM	20/05/1985	Compuesto	Costa norte y selva
PMS-635 (Sint. Amarillo Ancash)	PCI UNALM	20/05/1985	Sintético	Costa central
PMV-661 (Amarillo Ancash)	PCI UNALM	20/05/1985	VPL	Costa central
PMC-1 (Peruano)	PCI UNALM	20/05/1985	Compuesto	Costa
PMC-5 (Tropical)	PCI UNALM	20/05/1985	Compuesto	Costa norte y selva
PMC-7 (Perla)	PCI UNALM	20/05/1985	Compuesto	Costa
PMV-260 (Amarillo La Molina)	PCI UNALM	20/05/1985	VPL	Costa central
PMV-273	PCI UNALM	20/05/1985	VPL	Costa
PM-104	PCI UNALM	6/05/1997	Híbrido triple	Costa norte y selva
PM-105	PCI UNALM	6/05/1997	Híbrido triple	Costa norte y selva

† Instituto Nacional de Investigación y Promoción Agraria; ‡ Instituto Nacional de Investigación Agraria; & Instituto Nacional de Investigación y Extensión Agraria; § Instituto Nacional de Innovación Agraria.
Fuente: [15, 31]

La Autoridad Nacional de Semillas de Perú tiene registrado 161 cultivares comerciales tanto de empresa públicas como privadas. Conviene indicar que la promoción de un híbrido está determinada por sus características de acuerdo a la demanda de los productores/consumidores de maíz. El criterio más importante en MAD es el potencial de rendimiento del híbrido y su adopción tiene relación directa con la producción y comercialización de semilla. Por ejemplo, el híbrido PM 204 fue el más vendido (13 millones de kilos) por la



APROSECEM, la entidad asociada al PCIM para la producción y comercialización de semilla en la década de 1970, cuando la semilla híbrida producida por APROSECEM alcanzó más del 90% del área de maíz sembrada en la costa de Perú [13].

En 1985 el PCIM inscribió en el Registro de Cultivares Comerciales 32 híbridos para costa norte, central, sierra y selva. Ese mismo año el Instituto Nacional de Promoción Agraria lanzó en la EEA El Porvenir – San Martín la VPL “Marginal 28 Tropical”, compuesto que resultó de la recombinación de 3 variedades experimentales del CIMMYT: Across 7728, Ferke 7928, La Máquina 7928. Esta variedad fue liberada para ser promovida en la selva peruana, aunque posteriormente fue difundida en la costa y valles interandinos hasta los 1800 m s.n.m. Además, muestra excelente aptitud para chala en la costa central. En la actualidad aún es demandada por su grano grande y color naranja.

Durante los últimos 20 años el INIA ha lanzado al mercado 13 cultivares de MAD, entre híbridos, sintéticos y VPL (Tabla 2), para condiciones de costa, valles interandinos y selva, de los cuales solo cinco se mantiene en el sistema nacional de producción de semilla, otros están siendo mejorados para su relanzamiento y promoción por ser de muy buena adaptabilidad y competitividad.

Para la costa norte, la estrategia es el desarrollo de híbridos simples con características de rusticidad y plasticidad a diferentes ecosistemas, que incluyen suelos con diferente textura (de arenosos a franco arcillosos) y alto contenido de sales. También conviene indicar que la demanda de forraje para la ganadería ha crecido en la costa norte, esto abre la posibilidad de probar sorgo que en asociación con maíz a fin de producir alta cantidad de forraje de excelente calidad.

El mejoramiento genético de maíz para la selva, ha centrado su atención en la obtención de nuevos cultivares (híbridos y variedades), formados con líneas derivadas de poblaciones del CIMMYT. La importancia social del cultivo de maíz radica en la cantidad de productores que se dedican a esta labor y, por ende, en la generación de mano de obra y la seguridad alimentaria, a nivel nacional se tiene 200 mil unidades productivas dedicadas a la producción de MAD, [32].

Se puede concluir que hay un crecimiento del área sembrada con semilla híbrida en relación a la sembrada con VLP; por ejemplo, en Lambayeque (costa) el año 2005 se sembró 2 000 ha con semilla híbrida y 22 000 con VPL; ahora se siembra 23 000 ha de híbridos y 1 500 ha con VPL. En la selva ocurre un fenómeno similar; en San Martín, para el mismo período de tiempo, el área sembrada con semilla híbrida pasó de 1 000 a 38 000 ha, mientras que el área sembrada con VLP disminuyó de 60 000 a 19 000 ha, (A. Gutiérrez, datos sin publicar).

Agronomía en Costa

Las nuevas tecnologías de agricultura de precisión constituyen una alternativa actual para ser usada por los pequeños y medianos agricultores, por lo que INIA generará una base de datos que incluye análisis de suelos y atención a los productores para generar información de los años 2020 y 2021 y proyectar las tendencias de rendimiento futuro de acuerdo al paquete de manejo recomendado, usando para ello herramientas como ARGIS,



QGIS, entre otras, conectados a la red nacional del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú -SENAMHI- y las estaciones meteorológicas del INIA en red.

La posibilidad de incrementar aún más los rendimientos por hectárea y mejorar la calidad son altas. Las perspectivas se presentan favorables si tenemos en cuenta las aceptables condiciones del ecosistema, genotipos de alto rendimiento y la franca posibilidad de mejorar las prácticas de cultivo aunadas a la adopción simultánea de las buenas prácticas agrícolas. Para ello es importante considerar: manejo del cultivo (instalación del cultivo, alta densidad de siembra, fertilización, control de malezas, plagas, enfermedades y cosecha) y elección del cultivar.

Las actividades agronómicas son bastante conocidas en el ambiente productivo del maíz amarillo duro en la costa.

Época de siembra. En la costa central se ha evaluado apropiadamente el efecto que tienen las épocas de siembra sobre el rendimiento de maíz grano. Se ha comprobado que las siembras de mayor rendimiento son las de invierno, comparadas con las de verano (la región central y la región sur de la costa peruana poseen dos estaciones bien marcadas: invierno, entre abril y octubre; y verano, entre noviembre y marzo; las temperaturas mensuales máximas suelen darse en febrero, entre 24 y 33 °C y las mínimas entre 15 y 18 °C, en julio). La siembra de invierno tradicional es entre julio y setiembre, que es la más recomendable y favorable por la menor incidencia de plagas y enfermedades, menor consumo de agua y, sobre todo, porque los rendimientos son generalmente mayores y más estables que los de verano. La siembra de verano, que ocurre entre noviembre y enero, se ha generalizado a la fecha, estimulada por el uso de híbridos que responden muy bien a estas condiciones.

Preparación del suelo. Los criterios en la preparación del suelo tienen coincidencias en cuanto a la necesidad y conveniencia de instalar el cultivo en un suelo limpio, con suficiente humedad, mullido y nivelado. En los valles de Pisco, Chincha y Cañete, generalmente la preparación del suelo lo ejecutan en seco, en los dos primeros debido a la poca disponibilidad de agua, mientras que en Cañete es una práctica asumida por experiencias propias del productor, en los demás valles la preparación del suelo se inicia con el riego de “machaco” (riego pesado, prolongado o de inundación, que permite que el suelo duro pueda absorber el agua a través de las capas duras y de este modo se ponga más suave y fácil de preparar con el arado). Prácticas de labranza de conservación deben ser estudiadas para validar su conveniencia en el sistema de producción de maíz.

Elección del cultivar. En el Perú hay más de 161 cultivares registrados de MAD. En la costa central predomina híbridos introducidos por empresas multinacionales de semilla. El comportamiento de estos híbridos es variable de acuerdo al ambiente y con frecuencia la decisión al adquirir determinada semilla se rige por la experiencia de siembra de los mismos productores, cuyos resultados son masificados entre ellos por lo que obtienen en la cosecha y por la labor de promoción de las empresas vendedoras de semilla. Resultados de una red de ensayos realizados entre 2012 y 2014 en 26 ambientes para evaluar 18 cultivares comerciales (híbridos y variedades) disponibles en el mercado nacional, mostraron que entre los 4 híbridos de mayor rendimiento de grano se tuvo a 2 de origen nacional, uno producido por INIA y el otro por el PCIM, los otros 2 son



producidos y distribuidos por empresas transnacionales, [21]. La recomendación para lograr un buen rendimiento de maíz amarillo duro, tanto en costa como en selva, debe tener como meta la promoción de híbridos simples conforme se hace en los países líderes en la producción mundial de maíz como los Estados Unidos de Norteamérica, China, Brasil, Argentina.

Instalación del cultivo. Los agricultores asocian la obtención de altos rendimientos con el uso de semillas mejoradas de calidad, adecuada densidad de siembra (número de plantas por hectárea) en combinación con una eficiente fertilización y riegos oportunos. Esto determina que en algunos departamentos se obtenga rendimientos superiores a 10 t/ha. Es una práctica constante el tratamiento que recibe la semilla a base de insecticidas – fungicidas de manera preventiva contra posibles daños por insecto y hongos, la siembra se efectúa generalmente en dos modalidades: manual (predominante) y a máquina (limitada). Los cultivares se siembran a las densidades recomendadas por los proveedores y también a las que los agricultores consideran como tradicionales para cualquier tipo de cultivar. A lo largo de los años y por el desarrollo de cultivares con características de hojas erectas actualmente se viene estandarizando una población de 75 500 plantas por hectárea, aunque no siempre se obtienen los resultados esperados por no disponer de información para cada una de las zonas o las limitaciones para utilizar las recomendaciones técnicas.

Fertilización. El productor de la costa central prioriza esta actividad considerando los tres elementos principales. Las dosis que generalmente aplican son: 240-100-120 o 260-120-140 de $N-P_2O_5-K_2O$. En el caso muy particular del valle de Pativilca (provincia de Barranca, departamento de Lima) en la época de invierno priorizan la siembra de papa, e inmediatamente rotan con maíz, aprovechando los residuos que quedan de ésta. Las fuentes generalmente son urea, fosfato di amónico y el sulfato de potasio, [15].

Manejo de plantas arvenses. En su ciclo vegetativo el maíz tiene un período, desde la emergencia hasta los 40 y 50 días, en que es más sensible al ataque de plantas arvenses o malezas. En la costa central se estila el control de este tipo de plantas en forma manual (con labranzas superficiales, utilizando lampa), mecanizado (con cultivadoras) y animal (con cultivadoras pequeñas a tracción animal). Adicionalmente, aquellos agricultores de mayor uso de tecnologías optan por el uso de herbicidas ya sea de pre o post emergencia, [15].

Riego. En la costa peruana, la precipitación fluvial es menor a 100 mm por año y por lo tanto es necesario aplicar agua de riego para obtener una cosecha de maíz. Hay información relacionada con la eficiencia del riego. En un estudio realizado en la UNALM se obtuvo rendimientos de 6.7, 5.8 y 4.8 t/ha de grano de maíz para 3 sistemas de riego. En el primer sistema la tensión de humedad fue de 6 bares y se aplicó 10 riegos a intervalos de 7 y 5 días con un gasto de agua de 6 039 m³/ha. En el segundo sistema la tensión de humedad fue de 15 bares y se aplicó 6 riegos a intervalos de 24 y 12 días con un gasto de agua de 5 566 m³/ha. El tercer sistema fue el riego tradicional en el que se utilizó 4 riegos con un volumen de agua utilizado de 5 823 m³/ha [25].

En la costa se utiliza 3 sistemas de riego: por gravedad, por aspersión y localizado. Hay diferencias en eficiencia, costos y facilidades de los agricultores para la adopción de estos sistemas. El más generalizado es el sistema por gravedad. Investigadores de



la UNALM [25] reportan los resultados de 2 sistemas de riego localizado, por goteo y exudación. El riego por exudación se realiza utilizando microporos en una cinta de material sintético colocada en el pie de la línea de plantas. En el riego por goteo se utiliza goteros instalados en el pie de la línea de plantas. Los resultados muestran que no hubo diferencias significativas entre ambos sistemas de riego.

En la costa es sistema más utilizado es el riego por gravedad e inicia con un riego de pre siembra denominado 'riego de machaco', la siembra se realiza unos días después cuando el suelo está en capacidad de campo; el primer riego o 'riego de enseño' se realiza lo más tarde posible, hasta 30 o 35 días después de la germinación, a fin de estimular un sistema radicular profundo y bien desarrollado [15].

En el cultivo de maíz se consideran 2 etapas críticas con relación a la disponibilidad de agua. Humedad para la germinación uniforme de la semilla, aunque hay que considerar que el maíz no tolera excesos de humedad al momento de la germinación. Humedad al momento de la floración, es fundamental que el cultivo disponga de agua una a dos semanas antes y después de la floración, dependiendo del período vegetativo del cultivo. El tiempo indicado es válido para maíces con un período vegetativo de 135 a 165 días; si el período vegetativo es mayor o menor hay que tener en cuenta estas consideraciones.

Plagas. Las plagas y enfermedades en su mayoría siempre existieron en el maíz, aunque las primeras se mantuvieron en un nivel de equilibrio biológico y ambiental, el mismo que se ha deteriorado en los últimos años. Al sembrar maíz todos los meses del año existe el medio favorable para la prevalencia de plagas principales, de otras secundarias, e incluso de algunas que habiendo permanecido como latentes o potenciales van convirtiéndose en principales, como sucede con el "chinche". Se han encontrado hasta 4 plagas consideradas principales: gusanos cortadores (*Feltia experta* Walker y *Agrotis ypsilon*), gusano picador (*Elasmopalpus lignosellus* Zeller), cogollero (*Spodoptera frugiperda*), cañero (*Diatraea saccharalis*) y el chinche (*Sthenaridea carmelitana* Carvalho), [15].

Enfermedades. Las condiciones ambientales de la costa central son diversas, lo cual hace que se puede expresar favorablemente al rebrote de algunas enfermedades existentes y en otras la aparición de nuevas enfermedades. Acompañado con algunos híbridos que muestran susceptibilidad a la presencia de ciertas enfermedades especialmente foliares. Una de las principales enfermedades que se observa en los valles maiceros del Perú es la "mancha de asfalto" (*Phyllachora maydis* y *Monographella maydis*), que se ha convertido en el principal factor limitante de la producción, especialmente en la costa norte y central. La alta humedad relativa (> 75%) favorece el desarrollo de esta enfermedad, [15]. Otras enfermedades potenciales importantes son la "mancha gris" (*Cercospora zea-maydis*) y pudriciones de mazorca causadas por diferentes patógenos como *Fusarium graminearum*, *Aspergillus flavus* y *Stenocarpella maydis*.

Cosecha. Generalmente la cosecha se inicia con el tumbado de la planta y esta ocurre entre 135 y 165 días después de la siembra, influenciado por el ambiente. Las plantas se dejan en campo por periodos de 10 a 15 días para proceder al despanque y posteriormente el traslado a una era para el secado hasta alcanzar el 14% de humedad, lo cual transcurre entre 15 y 30 días, luego se procede al desgrane, [15].

Labranza mínima y riego tecnificado. En Vista Florida se comparó el sistema de labranza cero o siembra directa (LC) y labranza tradicional (LT), ambos con riego por



goteo, empleando el híbrido simple INIA 619 Megahíbrido en asociación con frijol Bayo Mochica (*Phaseolus vulgaris*). Los resultados revelan que el consumo de agua en LC es de 3 300 m³/ha y en LT de 5 600 m³, para obtener 14.2 t/ha y 9.8 t/ha, respectivamente, en campos con labranza cero. Esta tecnología podría reducir los altos costos de producción del maíz en el Perú (P. Injante, datos sin publicar).

Agronomía en Selva

Entre enero y marzo de 2021 en la selva de Perú se cosecharon alrededor de 161 687 t, en una superficie cosechada de 52 487 ha, con un rendimiento promedio de 2.8 t/ha [33]. En la región San Martín el maíz y el arroz son los cultivos de mayor importancia socioeconómica. La producción de maíz básicamente es de maíz amarillo duro, cuyo grano es utilizado en alimentación humana en forma de choclo, harinas y chicha y alimentación animal en forma directa y en la elaboración de alimentos balanceados.

En la selva de San Martín se cuenta con la mayor superficie cultivada y con la mayor productividad. La superficie sembrada entre agosto 2019 y julio de 2020 fue de 44 963 ha, cosechándose 44 949 ha con producción de 126 914 t y productividad de 2.82 t/ha, de un total de 24 405 productores, siendo comercializado a precio de chacra de S/ 0.93 por kg [34].

Factores limitantes en la baja productividad. Esta se debe al nivel tecnológico empleado, el cual es muy variado y depende del nivel socioeconómico y cultural del agricultor y de las condiciones edafoclimáticas de la región. El 92% de las áreas sembradas se encuentran en suelos de laderas, bajo condiciones de secano con distribución de lluvias erráticas. Existen deficiencias en el manejo agronómico del cultivo y de fertilizantes, inadecuado control de malezas, de enfermedades e insectos principalmente del gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda*). La presencia de suelos ácidos con saturación de aluminio mayor al 70% y con baja disponibilidad de fósforo también son una limitante para obtener buenos rendimientos y para poder incrementar la superficie sembrada con el cultivo. Otro factor limitante es el no uso de prácticas de conservación de la fertilidad y la integridad de los suelos, (P. Díaz, datos sin publicar).

Uso de semilla de MAD en el Perú

La demanda de semilla para la producción del MAD que requiere la industria de alimentos para animales en el Perú se satisface con semilla importada, semilla nacional y semilla propia. Sin embargo, actualmente la utilización de semilla mejorada por parte de los agricultores es muy baja (menor al 10% de semilla certificada producida en el Perú) y esto es una de las razones de los bajos rendimientos de grano. Cabe mencionar que en la década de 1970 cuando el uso de semilla híbrida de maíz fue mayor al 90% el país logró ser autosuficiente en la producción de maíz. Indudablemente esta no es la única razón de la autosuficiencia de maíz para satisfacer los requerimientos de la industria de alimentos balanceados, pero si se debe considerar a la semilla como un insumo importante en los programas de incremento de la producción. En las regiones de Lima y Ancash donde los rendimientos promedio de maíz son cercanos a 10 t/ha, los agricultores utilizan semilla de híbridos de alto potencial de rendimiento ratificando las ventajas de la utilización de semilla mejorada tanto por su valor intrínseco como por la motivación de mejorar las labores agronómicas del cultivo para que el híbrido pueda expresar su valor de rendimiento.



Cultivares de maíz amarillo duro en el Perú. Actualmente existen 161 cultivares mejorados de MAD inscritos en el Registro de Cultivares Comerciales (RCC) que conduce la Autoridad en Semillas, [35]. De estos, 46 pertenecen al sector público (34 al PCIM de la UNALM y 12 al INIA). Es decir que el 72% pertenecen a empresas privadas. En la Tabla 3 se puede verificar que 75 cultivares fueron inscritos por un grupo de 18 empresas privadas. Cabe precisar que en 1985 el PCIM inscribió la totalidad de sus cultivares y desde ese año dejó de hacerlo. La institución nacional que ha seguido produciendo cultivares mejorados de MAD es el INIA, el año 2012 lanzó al mercado el híbrido simple INIA 619 y el 2021 otro híbrido simple, el INIA 626 Akira en la EEA Donoso.

TABLA 3. Principales empresas obtentoras o solicitantes de inscripción de cultivares de maíz amarillo duro en el Perú

Obtendor / Solicitante de inscripción en el RCC	Nº de cultivares inscritos
PCIM de la UNALM	34
INIA	12
Dow Agrosciences	8
Pioneer Hi-Bred International INC.	7
Jean Carlo Landiar	6
Semeali Sementes Híbridas Ltda	5
Syngenta Sementes S.A. Brazil	5
Advanta Seeds International	4
Agricomseeds S.R.L.	4
San Fernando S.A.	4
Sementes Cargill (Brazil)	4
Syngenta Crop Protection	4
Dow Agroscience	3
KWS Melhoramento e Sementes L.T.D.A.	3
Monsanto Seeds LTD (Thailand)	3
Pacific Seed Thai LTD, Miembro de Advanta	3
Pedro José Maranessi Figuerola	3
Productora de Semillas S.A	3
Santa Helena Semantes	3
Semillas Valle S.A.	3
OTROS (menos de 2 cultivares inscritos en el RCC)	43

Fuente: [35]

Si se asume que para sembrar 1 ha de MAD se emplea aproximadamente 25 kg, entonces la demanda de semilla para cubrir las 254 743 ha de MAD que hay en el país es de 6 400 toneladas. Aproximadamente, el 34% de esta demanda es cubierta con semilla común, el 57% con semillas importadas y el restante 9% con semillas certificadas de producción nacional, (A. Chávez, datos sin publicar).



Importación de semilla de maíz amarillo duro. La importación promedio de semilla de MAD de los últimos once años (2010-2020) es de 2844.6 toneladas (Tabla 4 y Fig. 7), es decir, 40.9% de toda la semilla importada al país en ese periodo, lo que significa en promedio 16.9 millones de US\$ CIF (35% de todo el dinero que el país invierte en importar semilla). El principal país de donde se importó semilla de MAD en 2020 fue México, seguido de Tailandia, Bolivia y Brasil (Fig. 8). Las principales empresas importadoras en 2020 fueron Hortus (34%), Farmex (27%), Interoconima (25%), TQC Semillas (3%) y otras empresas (11%), (COMEX, 2021). Tanto Hortus como Farmex distribuyen materiales desarrollados por Monsanto [36].

TABLA 4. Cantidad de semilla de los cultivares de MAD que más se comercializaron en el país durante los últimos once años.

Cultivares	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	Total (t)	Promedio (t)
DK 7088	275,1	730,2	1159,4	1021,4	733,7	941,4	456,4	829,5	623,4	649,2	722,7	8142,5	740,2
DK 399	2,1		309	458,8	362,7	136,4	504	452,9	333,8	559,5	583,4	3702,6	370,3
DK 7508						95,2	332,4	706,9	400,1	629,5	495,3	2659,3	443,2
DK 1596	174,3		347,9	611,3	822,5	295,9	187,6					2439,5	406,6
AG 1596	386,2	666,1	238,1									1290,4	430,1
DK 7500						194,1	250,3	126,3	130,4	268,6	262,8	1232,5	205,4
Insignia 860		0,2		33,6	50,9	76,4	161,6	234,9	145,3	214,2	177	1094,1	121,6
Emblema 777								12,4	97,6	296	504,7	910,6	227,7
2B 688	79,8	100	89,6	207,9	73,6	40,6	119,7					711,1	101,6

Fuente: Cortesía de las Ings. M.Sc. Susana Chumbiauca Mateo y Lucía Pajuelo Cubillas, en base a datos de la SUNAT (2020).

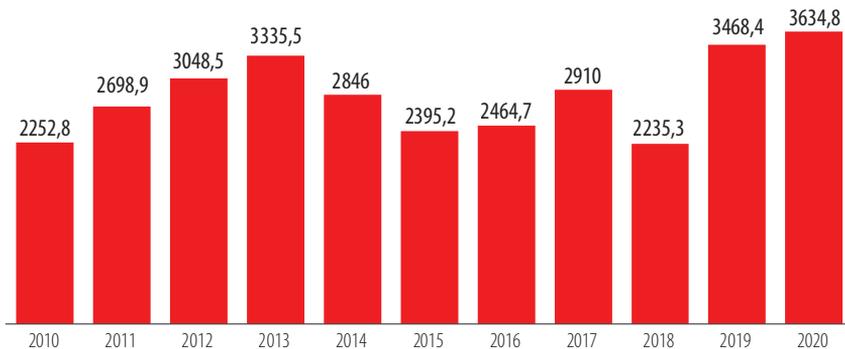


FIGURA 7. Importación de semilla (t) de maíz amarillo duro de 2010 a 2020.

Fuente: COMEXPERU en base a datos de la SUNAT (2020). Cortesía del Dr. Oscar R. De Córdova, director ejecutivo de APESemillas.

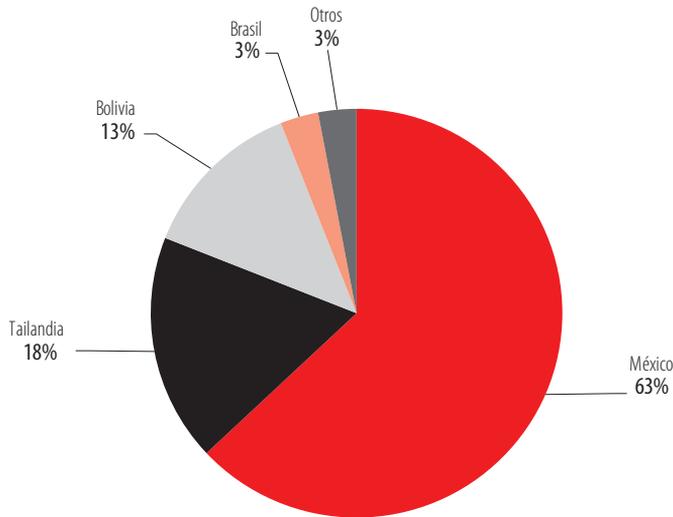


FIGURA 8. Origen de la semilla de maíz amarillo duro (MAD) importada en 2020.

Fuente: COMEXPERU en base a datos de la SUNAT (2020). Cortesía del Dr. Oscar R. De Córdova, director ejecutivo de APESemillas.

Los cultivares de los cuales se importó más semilla en los últimos once años se muestran en la Tabla 4. Es preciso anotar que ninguno de estos cultivares aparece actualmente en el RCC que conduce la Autoridad en Semillas.

Producción de semillas de maíz amarillo duro en el Perú. Los cultivares híbridos extranjeros son destinados principalmente para la costa norte y centro, con una limitada disponibilidad en la selva. En esta región, la principal variedad que utilizan los productores de selva baja es Marginal 28 Tropical, muy demandada por los agricultores de selva pues responde bien en condiciones de suelos aluviales de restingas, bajo condiciones de secano, escaso uso de fertilizantes y agroquímicos, alcanzando rendimientos de hasta 5 t/ha. Esta variedad no ha podido ser reemplazada por otro cultivar de similares características [36].

La Ley General de Semillas y su Reglamento General señala que las creaciones fitogenéticas deben ser inscritas en el Registro Nacional de Variedades Vegetales Protegidas, y cuyo creador posee el correspondiente Certificado de Obtentor otorgado por el Instituto Nacional de Defensa de la Competencia y de la Protección de la Propiedad Intelectual -INDECOPI-. Hasta diciembre de 2014 se expidieron 90 certificados de obtentor, pero ninguno de ellos corresponde a cultivares de MAD, indicando un escaso interés en producir semilla de híbridos a nivel nacional, y, por consiguiente, un escaso interés por importar parentales o germoplasma como base para nuevas obtenciones vegetales [36].

En el Perú se admite la producción y comercialización de las siguientes clases y categorías de semillas de maíz amarillo duro:



1. Semilla Genética
2. Semilla Certificada, producida bajo el proceso de certificación; comprende las siguientes categorías:
 - Categoría Básica o de Fundación
 - Categoría Registrada
 - Categoría Certificada
 - Categoría Autorizada.
3. Semilla No-Certificada

Se entiende por semilla No-Certificada, cualquier semilla que se ofrezca a la venta y que no cumple con los requisitos indicados para la semilla certificada debido a que no es sometida a dicho proceso. Sin embargo, deberá rotularse y reunir los requisitos mínimos de calidad, establecidos en el reglamento específico de semillas por cultivo y demás disposiciones complementarias. Como la semilla No-Certificada no es sometida a los controles oficiales en su producción, la garantía de su calidad es responsabilidad de su productor.

Actualmente, las semillas importadas son reconocidas como de la clase No-Certificada al momento de ser introducidas en el país. Existe el procedimiento de homologación de semillas que permite que el lote de semillas sometidas al proceso de certificación oficial en el país de origen sea reconocido como tal en el Perú, sin embargo, hasta el momento aún no se reportan homologaciones [36].

La producción de semillas clase Certificada de híbridos de MAD, se realiza solo como categoría Autorizada, pues el Reglamento Específico de Semillas de Maíz no contiene disposiciones para el registro, certificación y producción de semilla de líneas parentales, con lo cual se podrían reconocer líneas parentales de las categorías básica, registrada o certificada, que serían el origen para la producción de híbridos de la misma categoría. Este es un vacío en la actual regulación de semillas de Perú, pues la categoría Autorizada corresponde a semilla cuya procedencia se desconoce, pero que posee suficiente identidad y pureza varietal, que ha sido sometida al proceso de certificación y que cumple con los requisitos establecidos para la semilla certificada (excepto en lo que a su procedencia se refiere). En buena cuenta, si la semilla que se importa es vendida como tal -sin llegar a producir semilla de la categoría Autorizada a partir de ella- seguirá siendo de la clase No-Certificada, es decir las 145 348 ha sembradas con las 3 633.7 t de semilla importada de MAD (Tabla 5). No se tiene información de cuánta semilla importada pasa a la siguiente fase, es decir, a la producción de semilla Autorizada.



TABLA 5. Cálculo de la tasa de uso de semilla certificada a diciembre de 2020.

Demanda / Oferta	Cantidad (t)	%	Clase y categoría de semilla	Tasa de uso de semilla certificada
Demanda de semilla Certificada para cubrir 254 743 ha de siembra [15].	6368,58	100		
Importación de semilla en 2020. Fuente: SUNAT (2020)	3633,68	57,1	No-Certificada	
Producción de semilla en el INIA [37]	614,19	9,6	Certificada	9,6
Déficit de semilla Certificada cubierta por semilla propia (del agricultor)	2120,71	33,3	No-Certificada	

La superficie (ha) sembrada actualmente con las 2 745.9 t de semilla de los híbridos importados más usados en 2020: DK 7088, DK 399, DK 7508, DK 7500, Insignia 860 y Emblema 777 (Tabla 4), representan el 43% de la importación (O. De Córdova, datos sin publicar).

La tasa de uso de semilla certificada mostrada en la Tabla 5 es incipiente. Si la tendencia es a disminuir esta tasa; en el contexto actual es necesario mayor transferencia de tecnología, difusión, promoción de los cultivares que genera el INIA y ajustes en la normatividad actual; de lo contrario, la dependencia de semilla importada seguirá en ascenso.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- En el Perú se siembran dos tipos de maíz, el amarillo duro (MAD) utilizado por la industria de alimentos para animales y maíz andino (MAN) o amiláceo (MAM) para consumo humano.
- La superficie sembrada con maíz en Perú es de 500 000 ha con cerca de 50% para cada tipo de maíz. El área sembrada por agricultor es menor a 1.5 ha para ambos tipos de maíz; por lo tanto, es un cultivo de agricultura familiar.
- La producción de maíz ha tenido un ritmo creciente en los últimos 60 años, sin embargo, no ha sido suficiente para satisfacer la demanda de MAD, que ha sido cubierta con la importación de más de 3 millones de toneladas de maíz por un valor de mil millones de dólares. Para el caso de MAN hay un pequeño excedente de la producción (menor al 5%) que se dedica a la exportación.
- La importación de MAD es superior al 70% de la demanda, lo que significa un problema para la seguridad alimentaria nacional. Por otro lado, existen 198 000



unidades agrícolas familiares que se dedican al cultivo de MAD, y por lo tanto deben ser consideradas en los planes de desarrollo a fin mejorar su sistema de vida al conseguir mayor rentabilidad en su sistema productivo.

- En el caso de maíz amiláceo, existe la posibilidad de que el agricultor de la sierra pueda incrementar sus ingresos diversificando los tipos de maíz que siembra y buscando estrategias para vincularlo al mercado nacional e internacional. El incremento en las exportaciones de maíz morado en los últimos años es una buena señal.
- Se debe reactivar la cadena productiva de MAD con la finalidad de definir una estrategia para incrementar la producción y eventualmente reducir las importaciones; debería gestarse un Consorcio con la participación de todos los integrantes de la cadena a fin de elaborar un plan de acción para Perú.
- Para el caso de MAN también se debe reactivar la cadena productiva con la finalidad de incrementar la rentabilidad del cultivo, vincular a los agricultores con el mercado y generar bienes con mayor valor agregado elaborando productos que consideren al maíz como materia prima.
- Tanto para MAD como para MAN, se debe tener un plan que incentive al agricultor un mayor uso de semilla certificada como un medio para incrementar los rendimientos y la rentabilidad del cultivo.
- La generación de tecnologías orientadas al incremento de la producción debe considerar un manejo sostenible de los recursos naturales y deben ser amigables con el ambiente.
- Debe haber un plan de capacitación que permita mejorar el conocimiento en las diversas áreas relacionadas con el maíz.

AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen la valiosa contribución de los colegas: Ing. MSc. Santos Maza y Silupú, Ing. MSc. Susana Chumbiauca Mateo, Ing. MSc. Lucía Pajuelo Cubillas e Ing. Virgilio Ramírez Romaní, por proporcionar las series de datos estadísticos relacionados a esta investigación; Ing. PhD. Oscar De Córdova Dianderas, por ceder información, las figuras 7 y 8 de este documento y datos relevantes sobre importación de semillas de maíz; e Ing. Pedro Injante Silva, quien contribuyó con el borrador de su estudio "Respuesta del cultivo de maíz INIA 619 "Megahíbrido" bajo labranza cero y riego por goteo en la costa del Perú" (sin publicar).

Se agradece además a la Red Latinoamericana del Maíz y al proyecto Tech Maíz, financiado por el Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED) por haber gestionado la elaboración y publicación de este artículo.



CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran no tener conflicto de interés.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Luis A. Narro León: Gestor de la idea original de la publicación y redactó: Abstract, Resumen, Introducción; El Maíz en el Perú (superficie, producción, demanda, demanda de maíz amarillo duro y consumo de carne de pollo); Conclusiones y Recomendaciones. Revisó y editó el documento.

Alexander Chávez Cabrera redactó: Uso de semilla mejorada de maíz amiláceo o maíz andino, Uso de semilla de MAD en el Perú (Cultivares de maíz amarillo duro en el Perú, Importación de semilla de maíz amarillo duro, Producción de semillas de maíz amarillo duro en el Perú), Conclusiones y Recomendaciones. Revisó y editó el documento.

Teófilo W. Jara Calvo redactó: Tecnologías disponibles y su adopción (maíz amiláceo o maíz andino, agronomía).

Teodoro P. Narro León redactó: Tecnologías disponibles y su adopción (Maíz amiláceo o maíz andino, Mejoramiento Genético, Agronomía).

Alicia E. Medina Hoyos redactó: Transferencia de Tecnología (Modelo de transferencia de tecnología).

Isaac Cieza Ruiz redactó: Maíz amarillo duro (Mejoramiento Genético, Agronomía en Costa)

Percy Díaz Chuquisuta redactó: Maíz amarillo duro (Agronomía en Selva).

Roberto Alvarado Rodríguez redactó: Maíz amarillo duro (Agronomía en Costa)

Fernando Escobal Valencia redactó: Transferencia de tecnología.



REFERENCIAS

- [1] Calzada, J. (1947). Resultados de la experimentación sobre el cultivo de maíz. Ministerio de Agricultura, Dirección de Experimentación Agrícola, Estación Experimental Agrícola La Molina. Circular No. 65.
- [2] Bocanegra, S. (1950). Producción de híbridos y variedades sintéticas de maíz amarillo para la costa central del Perú. Ministerio de Agricultura, Dirección de Experimentación Agrícola, Estación Experimental Agrícola La Molina. Boletín No 38.
- [3] Bocanegra, S. (1956). Resultados obtenidos en el Programa de Maíz en la Estación Experimental Agrícola de 'La Molina' – Campaña 1954-55. PCEA Estación Experimental Agrícola La Molina. Informe Anual 1956 Año 30. Pag 20-33.
- [4] Bocanegra, S. (1954). El maíz híbrido LM # 3. En: *La vida Agrícola*. Vol. XXX No 354.
- [5] Instituto Nacional de Innovación Agraria. (2018). *Rol del INIA en el Proceso Histórico de la Investigación Agraria en el Perú*. Lima-Perú.
- [6] Grobman T, A. (2004). Fundación y desarrollo del Programa Cooperativo de Investigaciones en Maíz. En *Cincuenta Años del Programa Cooperativo de Investigaciones en Maíz (PCIM)*. Lima: Universidad Nacional Agraria La Molina.
- [7] Salhuana M., W. (2004). Diversidad y descripción de las razas de maíz en el Perú. En *Cincuenta Años del Programa Cooperativo de Investigaciones en Maíz (PCIM)*. Lima: Universidad Nacional Agraria La Molina.
- [8] Salhuana M, W. & Scheuch H., F. (2004). Cincuenta Años del Programa Cooperativo de Investigaciones en Maíz (PCIM). En *Cincuenta Años del Programa Cooperativo de Investigaciones en Maíz (PCIM)*. Lima: Universidad Nacional Agraria La Molina.
- [9] Sevilla Panizo, R.; Salhuana M., W. & Chura Ch., J. (2004). La colección de germoplasma de maíz de Perú. En *Cincuenta Años del Programa Cooperativo de Investigaciones en Maíz (PCIM)*. Lima: Universidad Nacional Agraria La Molina.
- [10] Grobman T, A; Salhuana M., W. & Sevilla P., R. in collaboration with Mangelsdorf, P.C. (1961). Races of maize in Peru: Their origins, evolution and classification. Publication 915. NAS-NRC, Washington, D.C. 1961.
- [11] Guzzon, F.; Arandia Rios, L.W.; Caviedes Cepeda, G.M.; Céspedes Polo, M.; Chávez Cabrera, A.; Muriel Figueroa, J.; Medina Hoyos, A.E.; Jara Calvo, T.W.; Molnar, T.L.; Narro León, L.A.; Narro León, T.P.; Mejía Kerguelén, S.L.; Ospina Rojas, J.G.; Vazquez, G.; Preciado-Ortiz, R.E.; Zambrano, J.L.; Palacios Rojas, N. & Pixley, K.V. (2021). Conservation and Use of Latin American Maize Diversity: Pillar of Nutrition Security and Cultural Heritage of Humanity. *Agronomy* 2021, 11, 172. <https://doi.org/10.3390/agronomy11010172>
- [12] Zambrano, J.L.; Yáñez, C.F. & Sangoquiza, C.A. (2021). Maize Breeding in the Highlands of Ecuador, Peru, and Bolivia: A Review. *Agronomy* 2021, 11, 212. <https://doi.org/10.3390/agronomy11020212>
- [13] Scheuch H., F. & Beingolea P., L. (2004). Producción de Semilla de Híbridos Desarrollados por el PCIM. En *Cincuenta años del Programa Cooperativo de Investigaciones en Maíz (PCIM)*. Lima: Universidad Nacional Agraria La Molina.
- [14] Instituto Nacional de Investigación y Promoción Agropecuaria (INIPA). (1983). Programa Nacional de Maíz: Documento Base. 70 pag.
- [15] Instituto Nacional de Innovación Agraria. (2020). *Manual técnico del cultivo de maíz amarillo duro*. Lima: Instituto Nacional de Innovación Agraria.
- [16] Narro León, T.P. & Piña Díaz, P.C. (2021). *Manual de producción de maíz amiláceo*. Lima: Instituto Nacional de Innovación Agraria.
- [17] La zonificación ecológica económica potencial de los suelos (2022, enero 30). Recuperado de [https://www.midagri.gob.pe/portal/43-sector-agrario/suelo#:~:text=En%20los%20cerros%20y%20colinas,\(andosoles\)%20de%20reacci%C3%B3n%20neutra](https://www.midagri.gob.pe/portal/43-sector-agrario/suelo#:~:text=En%20los%20cerros%20y%20colinas,(andosoles)%20de%20reacci%C3%B3n%20neutra)
- [18] Climas del Perú – Mapa de Clasificación Climática Nacional (2022, enero 30). Recuperado de <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/014045ENA-4.pdf>
- [19] Día nacional del maíz morado, maíz choclo y maíces para cancha (2021, noviembre 26). *Diario Oficial del Bicentenario El Peruano*. Recuperado de <https://busquedas.elperuano.pe/download/url/declaran-el-dia-05-de-mayo-de-cada-ano-como-dia-nacional-de-ordenanza-no-0337-2021-midagri-2015581-1>



- [20] Exportación de maíz blanco peruano crece 7% en volumen en el primer trimestre del 2021 (2022, enero 30). Recuperado de <https://agraria.pe/noticias/exportacion-de-maiz-blanco-peruano-crece-7-en-volumen-en-el-24116>
- [21] Medina Hoyos, A.E.; Narro León, L.A. & 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. <https://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2020.03.01>
- [22] Quevedo Willis, Sergio. (2013). *Manual Técnico: Maíz Blanco Urubamba (Blanco Gigante Cusco)*. Lima: Instituto Nacional de Innovación Agraria.
- [23] Desarrollo del Comercio Exterior Agroexportador (2022, enero 30). Recuperado de <https://recursos.exportemos.pe/Desarrollo-comercio-exterior-agroexportador-2020.pdf>
- [24] Sevilla P., R. (2004). Mejoramiento de maíz en la sierra del Perú. En *Cincuenta Años del Programa Cooperativo de Investigaciones en Maíz (PCIM)*. Lima: Universidad Nacional Agraria La Molina.
- [25] Davelouis M., J.R.; Arca B., M.N.; Valdez M., A.; Sevilla P., R.; Noriega N., V. & Benites J., J.R. (2004). Investigación agronómica en maíz. En *Cincuenta Años del Programa Cooperativo de Investigaciones en Maíz (PCIM)*. Lima: Universidad Nacional Agraria La Molina.
- [26] Salhuana M., W.; Valdéz M., A.; Scheuch H., F. & Davelouis M., J.R. (2004). *Cincuenta Años del Programa Cooperativo de Investigaciones en Maíz (PCIM)*. Lima: Universidad Nacional Agraria La Molina.
- [27] Instituto Nacional de Investigación Agraria. (2003). Control del "gusano de la mazorca del maíz" *Heliothis zea* con aceite vegetal. Hoja Divulgativa N° 4. Agosto de 2003.
- [28] Medina Hoyos, A.E.; Yoshino, M.; Morita, T.; & Maruyama, H. (2016). *Guía de Producción Comercial de Maíz Morado: Basado en el Trabajo del Proyecto IEPARC*. Cajamarca: Martines Compañon Editores S.R.L.
- [29] Agraria.pe. (2021). Exportaciones de maíz morado crecen exponencialmente en 2020: alcanzan los US\$ 12.5 millones. <https://agraria.pe/noticias/exportaciones-de-maiz-morado-crecen-exponencialmente-en-2020-23444>
- [30] Sánchez C., H. (2004). Mejoramiento Genético en Costa y Selva. En *Cincuenta años del Programa Cooperativo de Investigaciones en Maíz (PCIM)*. Lima: Universidad Nacional Agraria La Molina.
- [31] Chura Ch., J.; Nakahodo N., J. & Fegan E., W. (2004). Mejoramiento Genético de Maíz en la Costa. En *Cincuenta años del Programa Cooperativo de Investigaciones en Maíz – (PCIM)*. Lima: Universidad Nacional Agraria La Molina.
- [32] INIA, 2008. Manejo agronómico del cultivo de maíz amarillo duro en selva baja. Serie: Iquitos – Perú. Folleto N° 1 – 2008. Noviembre, 2008.
- [33] AGRODATAPERU (2021). Maíz Amarillo Perú Importación. <https://www.agrodataperu.com/2021/04/aiz-amarillo-peru-importacion-2021-marzo.html>
- [34] Ministerio de Agricultura y Riego – SIEA. (2020). Perfil productivo y competitivo de los principales cultivos del sector. Disponible en: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrjoiYzE2YzA3YWUzZGZiZi00NDZmLTliYyYyOTI1MTU5MlQ2ZjZiZWwzMDg0NjI3LTdmNDAtNDg3OS04OTE3LTk0Yjg2ZmZmZWYzZiJ9>
- [35] Instituto Nacional de Innovación Agraria. Área de Regulación de Semillas. (2020). Registro de Cultivares Comerciales 2020.
- [36] Chumbiaca M., S. (2017). Caracterización de la Producción y Comercialización de Semillas de Maíz Amarillo Duro en el Perú. Dissertação (Mestrado Profissional) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Sementes. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, RS. <http://guaiaca.ufpel.edu.br:8080/handle/prefix/6249>
- [37] Instituto Nacional de Innovación Agraria. (2021). Sistema de disponibilidad de Semillas, Plantones y Reproductores. <http://www.inia.gob.pe/disponibilidad-de-semillas/>

Hitos tecnológicos que cambiaron el rol de Brasil en la producción de maíz: 30 años de crecimiento para convertirse en importante actor del escenario mundial, una revisión

Lauro José Moreira Guimarães^{1*}, Frederico Ozanan Machado Durães¹, Maria Marta Pastina¹, Roberto Williams Noda¹, Sidney Netto Parentoni¹, Paulo Evaristo de Oliveira Guimarães¹, Roberto dos Santos Trindade¹, José Luis Zambrano²

¹ Embrapa Milho e Sorgo. C.P. 151, MG 424 km 45, Sete Lagoas, MG, Brasil.

² INIAP, Estación Experimental Santa Catalina, Panamericana sur Km 1, Cutuglahua 171108, Ecuador

*Autor para Correspondencia, e-mail: lauro.guimaraes@embrapa.br

Technological milestones that changed Brazil's role in corn production: 30 years of growth to become an important player on the world stage, a review

Resumen

En los últimos 30 años (cosechas agrícolas de 1991/92 a 2021/2022), el maíz ha experimentado una verdadera revolución en Brasil. Actualmente, el país se ha consolidado como el tercer productor y segundo exportador de este cereal, con una producción de más de 100 millones de toneladas de este grano por año agrícola. En este periodo, el cultivo de soja (soya) se destaca como el gran impulsor de los avances tecnológicos, llevando al maíz y a otros cultivos a posiciones más destacadas y transformando los sistemas de producción de granos, que antes eran de monocultivo o rotación, a sistemas más intensificados, con dos (o más) cultivos agrícolas por año en la misma área. La región del Cerrado brasileño, antes considerada no apta para la agricultura, es hoy el gran granero de Brasil. En estas tres décadas de escalada en la producción de maíz, se destacan algunos hitos legales y tecnológicos, como la Ley de Protección de Cultivares y su reglamento (desde 1997), el Sistema de Siembra Directa, el cultivo de maíz en segunda cosecha o safrinha (después de la soja) y el uso de biotecnologías. Estos factores fueron determinantes para que el crecimiento de la producción de maíz superara en más de 3,6 veces el volumen de la campaña agrícola 1991/92 (pasando de 30,7 para más de 112 millones de toneladas en 2021), mientras que el área destinada al cultivo de maíz aumentó solo 1,5 veces (de 14 para 20,8 millones de ha, no periodo). Los incrementos en la productividad están ligados a tecnologías y conocimientos aplicados a la gestión de los sistemas productivos, en la rotación soja-maíz, y no solo en un cultivo aislado; permitiendo mayores avances en la producción bruta de ambos granos (rendimientos recientes en la cosecha de maíz son unas 2,5 veces mayores que hace 30 años, alcanzando 5,3 t ha⁻¹). Este trabajo presenta datos y hechos que permitieron a Brasil salir de una posición de vulnerabilidad, en cuanto a la oferta de grano de maíz, para convertirse en un actor importante en la producción y comercialización de este cereal a nivel mundial.



Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /
Edited by:
Gabriela Albán

Recibido /
Received:
28/02/2022

Aceptado /
Accepted:
05/04/2022

Publicado en línea /
Published online:
16/05/2022



Palabras clave: *Zea mays* L., maíz en segunda cosecha–safrinha, productividad, protección de cultivares, tecnologías de cultivo.

Abstract

Corn has experienced a true revolution in Brazil during the last 30 years (agricultural harvests from 1991/92 to 2021/2022). Currently, the country has established itself as the third producer and second exporter worldwide of this cereal, with a production of more than 100 million tons of this grain per agricultural year. In this period, soybean cultivation stands out as the great driver of technological advances, leading corn and other crops to more prominent positions and transforming grain production systems; previously monoculture or rotation, to more intensified systems, with two (or more) agricultural crops per year in the same area. The Brazilian Cerrado region, previously considered unsuitable for agriculture, is today the great barn of grain production in Brazil. In these three decades of escalation in corn production, some legal and technological milestones stand out, such as the Law for the Protection of Cultivars and its regulations (since 1997), the direct sowing system, the cultivation of corn in the second harvest (after soybean), and the use of biotechnologies. These factors were decisive for the growth of maize production to exceed by more than 3,6 times the volume of the 1991/92 agricultural season (30,7 million tons, at that time, to 112 million tons in 2021), while the area devoted to maize cultivation increased only 1,5 times (14 million ha in 1991/92 to 20,8 million ha after 30 years). Increases in productivity are linked to technologies and knowledge applied to the management of production systems, soybean-corn, and not only in an isolated crop; allowing greater advances in the gross production of both grains (recent yields in the corn harvest are about 2,5 times higher than 30 years ago – reaching more than 5,3 t.ha⁻¹). This article shows data and facts that allowed Brazil to get out of a position of vulnerability, in terms of corn supply, to become an important player in the production and marketing of this cereal worldwide.

Keywords: *Zea mays* L., second season maize – “safrinha”, yield, Plant Variety Protection, crop technology.

INTRODUCCIÓN

A principios de la década de 1980, Brasil importaba alimentos, siendo el maíz básicamente un cultivo de subsistencia, cultivado en campos pequeños, utilizando baja tecnología, tanto en términos de manejo de cultivo como en términos de genética de cultivares. La mayoría de las veces se utilizaron semillas de variedades de polinización abierta, sin tratamiento para el control de insectos del suelo y hongos fitopatógenos en la fase inicial del cultivo. La siembra se realizaba con semillas que dejaban mucho que desear en cuanto a clasificación y estandarización. En muchos casos, la siembra se hacía de forma manual o con maquinaria de tracción animal, y las sembradoras mecánicas, cuando se utilizaban, no proporcionaban la densidad adecuada (espaciado entre semillas, profundidad de siembra, velocidad de operación y otros ajustes). En consecuencia, el rodal promedio (poblaciones de plantas) era bajo y la distribución de plantas en el campo era heterogénea. Se utilizaban pocos insumos, con fertilización insuficiente para lograr una alta productividad. El control de plagas a menudo



no era suficiente para llevar a las poblaciones por debajo del nivel de daño económico y no se practicó el control de enfermedades foliares. También estaba el problema de la acidez, los altos niveles de saturación de aluminio y la baja fertilidad natural de los suelos, especialmente en la región Tropical localizada en la parte central de Brasil, típicamente del bioma conocido como Cerrado. La mayoría de los cultivares no se adaptaron a las condiciones del Cerrado y tuvieron un ciclo tardío y un tamaño de planta alto, lo que provocó problemas en la cosecha debido a la alta tasa de acame y rotura de tallos.

A pesar de este escenario desfavorable para la producción de maíz en Brasil en la década de los ochenta; existieron, en los últimos 30 años, eventos tecnológicos que permitieron que el país se convirtiera en un actor importante en la producción de maíz a nivel mundial. Actualmente, Brasil es el tercer mayor productor de maíz del mundo, cosechando cerca de 100 millones de toneladas de granos de maíz en los últimos años, solo por detrás de Estados Unidos de América y China, y se ha consolidado como el segundo mayor exportador de este cereal, con solo los EE. UU por delante [1].

En el escenario rural brasileño, el maíz es uno de los cultivos destacados, siendo cultivado en un área aproximada de 20 millones de hectáreas, con una producción total de alrededor de 112 millones de toneladas de granos en la zafra 2021/22 [2]. Actualmente, el maíz ocupa el segundo lugar después de la soja, tanto en superficie cultivada como en producción bruta (unas 40 millones de ha y 125 millones de toneladas de soja), y la producción de la oleaginosa se concentra básicamente en la temporada de cultivo primavera/verano (primera cosecha - de septiembre a febrero), mientras que el cultivo de maíz tiene dos temporadas principales: cosecha (septiembre/octubre a febrero/marzo) y fuera de temporada, también conocida como safrinha (de febrero a julio), o primera y segunda cosecha, respectivamente.

Este artículo presenta y analiza algunos hitos tecnológicos sobre cómo las nuevas técnicas o tecnologías emergentes permitieron avances en productividad y en la forma de producir este grano con mayor sustentabilidad.

El objetivo de este trabajo es presentar una revisión de los principales factores agronómicos, tecnológicos y regulatorios que permitieron a Brasil pasar de una condición de vulnerabilidad como productor de maíz a uno de los mayores productores y exportadores de maíz del mundo, en un periodo de 30 años.

METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

Para este trabajo de revisión se buscó información y trabajos científicos, principalmente a través de herramientas de búsqueda en internet y páginas web oficiales de importantes instituciones que se ocupan de la agricultura y los cultivos de maíz y soja, tales como: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO); Gobierno de Brasil (Brasil); Ministerio de Agricultura, Ganadería y Abastecimiento de Brasil (MAPA); Empresa Brasileña de Investigación Agropecuaria (Embrapa); Instituto Agronómico de Campinas (IAC); y, Empresa Nacional de Abastecimiento (CONAB).

Los datos presentados fueron extraídos de las páginas webs oficiales de CONAB. A partir de las planillas oficiales, que contienen series históricas de superficie cultivada,



producción y rendimiento de grano por año. Se filtraron y seleccionaron datos para el periodo informado (30 años, de 1981/82 a 2021/22), lo que permitió la elaboración de gráficos y tablas utilizando el programa Excel.

Este trabajo de revisión fue elaborado con base a datos oficiales y hechos relevantes del periodo, como la promulgación de Leyes y decretos, informes expresados en la literatura científica y en páginas oficiales de instituciones consolidadas y respetadas, aprovechando también la experiencia de los autores, investigadores en el área Agronómica y afines.

Bases para los avances en la producción de granos en las zonas tropicales de Brasil

El establecimiento de una agricultura moderna de base tropical ocurrió principalmente en las regiones del Cerrado brasileño y fue un proceso multiinstitucional y multidisciplinario, donde muchos contribuyeron para que gran parte de los alimentos producidos en el mundo provengan de estas áreas. Inicialmente, hubo dos desafíos principales: uno relacionado con las características químicas de los suelos del Cerrado, que tenían alta acidez, asociada con alta saturación de aluminio tóxico y baja disponibilidad de fósforo; y el otro, relacionado con el germoplasma, que en la mayoría de los casos no mostró adaptaciones al cultivo en clima tropical y en suelos de sabana. Las regiones del Cerrado fueron consideradas más aptas para pastos, para la ganadería extensiva de baja productividad. Con el avance de la agricultura, en las décadas de 1970 y 1980, el principal cultivo utilizado en el cerrado fue el arroz de secano, luego, con los avances tecnológicos, hubo espacio para la soja, que rápidamente se perfiló como un cultivo con mayor valor agregado. Y finalmente, el maíz, sorgo, algodón, caña de azúcar, girasol, trigo, entre otros, mostraron un crecimiento sustancial en estas regiones.

La investigación pública y la adaptación del germoplasma a las áreas tropicales de Brasil

La investigación pública jugó un papel clave en la adaptación y el desarrollo de la gestión del cultivo de soja en Brasil en los primeros periodos, como lo informó Vidal (2015) [3]. Los institutos públicos de investigación agrícola, como el IAC (Instituto Agronómico de Campinas), a partir de la década de 1930, y Embrapa (Empresa Brasileña de Investigación Agropecuaria), a partir de la década de 1970, realizaron programas de investigación y mejoramiento con el cultivo de la soja que permitieron los avances posteriores. Fueron seleccionados materiales que establecieron la base genética de la soja con un largo periodo juvenil; esta característica permitió ampliar el territorio de cultivo, antes restringido al sur del país, a todo Brasil. La obtención de cultivares de soja adaptados a regiones con latitudes más bajas, con días cortos, también fue reportada por Campelo *et al.* (1998) [4]. Además de las condiciones de días cortos del clima tropical, los nuevos cultivares necesitaban adaptarse a los suelos del Cerrado y, en ese sentido, se lograron grandes avances en prácticas de manejo de suelos, nutrición vegetal, desarrollo de inoculantes específicos para fijación de nitrógeno (FBN) y manejo integrado de plagas y enfermedades. De esta manera, la soja pudo llegar a territorios que no eran propicios para su cultivo. Este movimiento fue conocido como "La Conquista del Cerrado" [3].



El Cerrado brasileño, a pesar de tener gran parte de los suelos con características químicas desfavorables que requieren corrección de acidez e incremento de nutrientes y materia orgánica, tiene una topografía muy favorable a la mecanización, por lo que se facilitan las operaciones del tractor y permiten la reducción de costos de producción a gran escala. Con la disponibilidad de cultivares de soja más adaptados a las condiciones del Cerrado, y los buenos precios pagados por el grano de esta oleaginosa, hubo una revolución que condujo a la intensificación de los sistemas de producción de granos, con mayores tasas de uso de insumos agrícolas y manejo específico.

El maíz tampoco estaba adaptado a las condiciones del suelo de las áreas del Cerrado, hecho que estimuló la búsqueda de soluciones, inicialmente por parte de instituciones públicas de investigación agrícola. A partir de la década de 1970, se inició en Brasil un gran programa de enriquecimiento de germoplasma de maíz, con la introducción de variedades tropicales, principalmente del CIMMYT y Tailandia. Estos materiales introducidos fueron trabajados a fines de la década de 1970 y principios de la de 1980, realizando varios ciclos de selección recurrente en programas de fitomejoramiento de instituciones públicas, como Embrapa, IAC y ESALQ (Escuela Superior de Agricultura Luiz de Queiroz). En red de socios, Embrapa realizó una serie de pruebas agronómicas en varias regiones de Brasil para evaluar esas variedades, en ambientes del Cerrado, con suelos ácidos y baja disponibilidad de fósforo (P).

Se obtuvieron cientos de variedades mejoradas localmente, las que fueron evaluadas en ambientes cerrados y en solución nutritiva con adición de aluminio (Al) para identificar materiales superiores en cuanto a tolerancia a este elemento tóxico y otras características de interés. Los trabajos permitieron identificar líneas superiores y se desarrolló y validó un híbrido doble (BR201), con mayor tolerancia al Al y mayor eficiencia en el uso del P. Este híbrido fue lanzado en 1987 por Embrapa, con indicación para condiciones del Cerrado, alcanzando 12% del mercado de maíz en Brasil a principios de la década de 1990 [5]. El germoplasma desarrollado por Embrapa en esa época fue ampliamente distribuido a institutos de investigación y empresas privadas de semillas de maíz, contribuyendo fuertemente para el establecimiento de una base de maíz tropical, adaptada a las condiciones de la sabana brasileña.

Embrapa Maíz y Sorgo avanzó en estudios genéticos de esos cultivos, identificando genes que confieren mayor tolerancia al Al y marcadores moleculares asociados. Actualmente, estos genes están siendo utilizados para el desarrollo de nuevas líneas e híbridos modernos, con base genética de alto potencial productivo con participación de germoplasma de clima templado, pero agregando tolerancia al Al [6].

La Ley de Protección de Cultivares y su impacto en el escenario agrícola brasileño

Para apalancar una industria de semillas que sea capaz de mantener vigorosos programas de mejoramiento genético, con la capacidad de proporcionar cultivares con las características necesarias para el crecimiento de la agricultura en Brasil, además, de tener germoplasma adaptado, fue necesario establecer un ambiente adecuado de "negocio". Esto solo se logró con avances en la legislación. Así, la Ley N° 9.456, de 25 de abril de 1997, conocida como "Ley de Protección de Cultivares" [7], fue uno de los hitos fundamentales que permitió avances tecnológicos en los sistemas de producción agropecuaria del país.



Sorprende que el mayor impacto de esta ley para el maíz no vino directamente sobre el cultivo en sí (pese al evidente beneficio directo), sino por los grandes avances que permitió para el cultivo de soja. Al ser una especie autógama, los cultivares de soja conservan sus características genéticas cuando se multiplican las semillas. Antes de que se estableciera la legislación para proteger los derechos de los obtentores, no había ningún incentivo para que el sector privado invirtiera en el mejoramiento genético de soja, ya que cualquier individuo (o empresa) podía apropiarse de los cultivares liberados sin que los desarrolladores obtuvieran un beneficio económico. En ese escenario, también fueron escasas las inversiones en equipos para el desarrollo del mercado de cultivos, venta de semillas, fertilizantes y otros insumos agrícolas, maquinaria y asesoría agronómica especializada. Hasta principios de la década de 1990, el área cultivada con soja en Brasil era menor que el área de maíz (9,5 millones de hectáreas de soja, frente a 14,5 millones de hectáreas de maíz) y la tecnología de cultivo de soja era incipiente y de poca inversión, por lo que los rendimientos eran bajos (alrededor de 2,1 t ha⁻¹) y, en consecuencia de la pequeña superficie y baja productividad, la producción nacional era pequeña, menos de 20 millones de toneladas de soja [1].

Con la sanción de la Ley N° 9.456, reglamentada por el Decreto N° 2.366, del 5 de noviembre de 1997, del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Abastecimiento (MAPA) [8], se garantizó la protección intelectual y la protección real para la explotación comercial de nuevos cultivares en Brasil, lo que generó un ambiente propicio para avances en emprendimientos e inversiones en el área de semillas. Hubo un claro estímulo a la industria de las semillas, en particular a los cultivos autógamos, como la soja. Así, los productores de esta oleaginosa comenzaron a contar con la disponibilidad de nuevos cultivares, con adaptación a las diferentes regiones del país, a las diferentes épocas de cultivo y con resistencia a las principales plagas y enfermedades [9].

El maíz también se benefició de mayores inversiones en mejoramiento genético, como resultado de la ley de protección de cultivares. Debido a la percepción de los productores tecnificados de que el uso de cultivares híbridos brindaba mayores rendimientos que las variedades de polinización abierta, la industria de semillas de maíz se fortaleció, trayendo nuevas dinámicas al mercado. Hubo una mayor disponibilidad de cultivares, híbridos con mayor potencial productivo, diferentes ciclos y otras características importantes para expansión a diferentes regiones y épocas de cultivo.

El sistema de siembra directa (SPD) y su importancia para el establecimiento de maíz fuera de temporada (segunda cosecha de maíz después de la soja)

En la evolución de los sistemas de producción, hubo una búsqueda de soluciones de manejo que permitieron una mayor agilidad en la siembra y capacidad operativa; en este contexto, se adoptó cada vez más el sistema de siembra directa (SPD, por sus siglas en portugués), reemplazando las operaciones de arado y dos rastras por la desecación de los cultivos de cobertura y plantación directa en paja con maquinaria adecuada. El SPD permitió ahorros en las operaciones agrícolas y también la posibilidad de sembrar incluso con mayor humedad del suelo, algo que no es posible en el sistema de cultivo convencional. Al presentar una serie de ventajas, como la reducción de la erosión laminar del suelo, reducción de la evaporación del agua del suelo, mejorar el ciclo de



nutrientes y ahorro de combustible. En 1991 empezó el escalamiento del SPD para la siembra de maíz en Brasil [10-11].

La adopción del SPD asociada a otros avances en el cultivo de soja, con la intensificación del uso de tecnologías en el Cerrado (manejo de fertilizantes, plagas y enfermedades, uso de maquinarias más grandes, con mayor capacidad operativa y con mejor calidad de operaciones, tanto de siembra como de cosecha) impulsaron con mucha fuerza la tecnificación del cultivo del maíz.

A raíz de la adopción tecnológica, se hizo posible la gran revolución en el cultivo del maíz en Brasil, la llamada safrinha, que es el cultivo del maíz en la misma área que la soja, a continuación de la oleaginosa. La soja, debido a su mayor valor de comercialización, se prioriza para ser cultivada en la época de mayor disponibilidad de lluvia (primavera/verano) con siembras a partir de fines de septiembre o principios de octubre (en la mayoría de las áreas de la región del Cerrado), con cosechas realizadas entre finales de enero y principios de marzo, según la región y el ciclo del cultivo. Una vez cosechada la soja, el terreno queda listo para la siembra de maíz, que no sería económica ni operativamente viable cultivar con las operaciones convencionales de preparación del suelo (arado y dos rastras), siendo posible establecer una segunda cosecha dentro del mismo año agrícola.

El maíz safrinha, que se siembra desde finales de enero hasta principios de marzo, después de la cosecha de la soja, naturalmente está sujeto a una menor disponibilidad de agua, y su viabilidad, en gran escala, solo fue posible gracias a la agilidad operativa del SPD. Esta rotación soja-maíz, en el Cerrado, transformó la región del Centro-Oeste de Brasil en la mayor productora de granos del país, cambiando la estructura agrícola nacional en un periodo de 30 años.

La rotación soja-maíz (safrinha) y la evolución tecnológica de los sistemas de producción de granos en Brasil

A partir de la zafra agrícola 1997/98, año en que se promulgó la Ley de Cultivares, la superficie de soja superó a la de maíz. En la campaña 2020/21, el área cultivada de soja fue equivalente a 39 millones de hectáreas, con rendimientos medios superiores a 3 500 kg ha⁻¹ y la producción bruta fue de 138 millones de toneladas, lo que convirtió a Brasil en el mayor productor mundial de granos de esta oleaginosa [12].

Es posible verificar una relación directa entre el crecimiento del área de soja y el cultivo de maíz fuera de temporada (91% de correlación), y también en el crecimiento de los volúmenes brutos de producción de soja y maíz en Brasil (93% de correlación). Estas relaciones se pueden ver en la Figura 1, que muestra el crecimiento simultáneo en el área cultivada (millones de ha), en la producción (millones de toneladas de granos) y en los rendimientos (kg ha⁻¹) de los cultivos de soja y maíz a lo largo de los últimos 30 años.

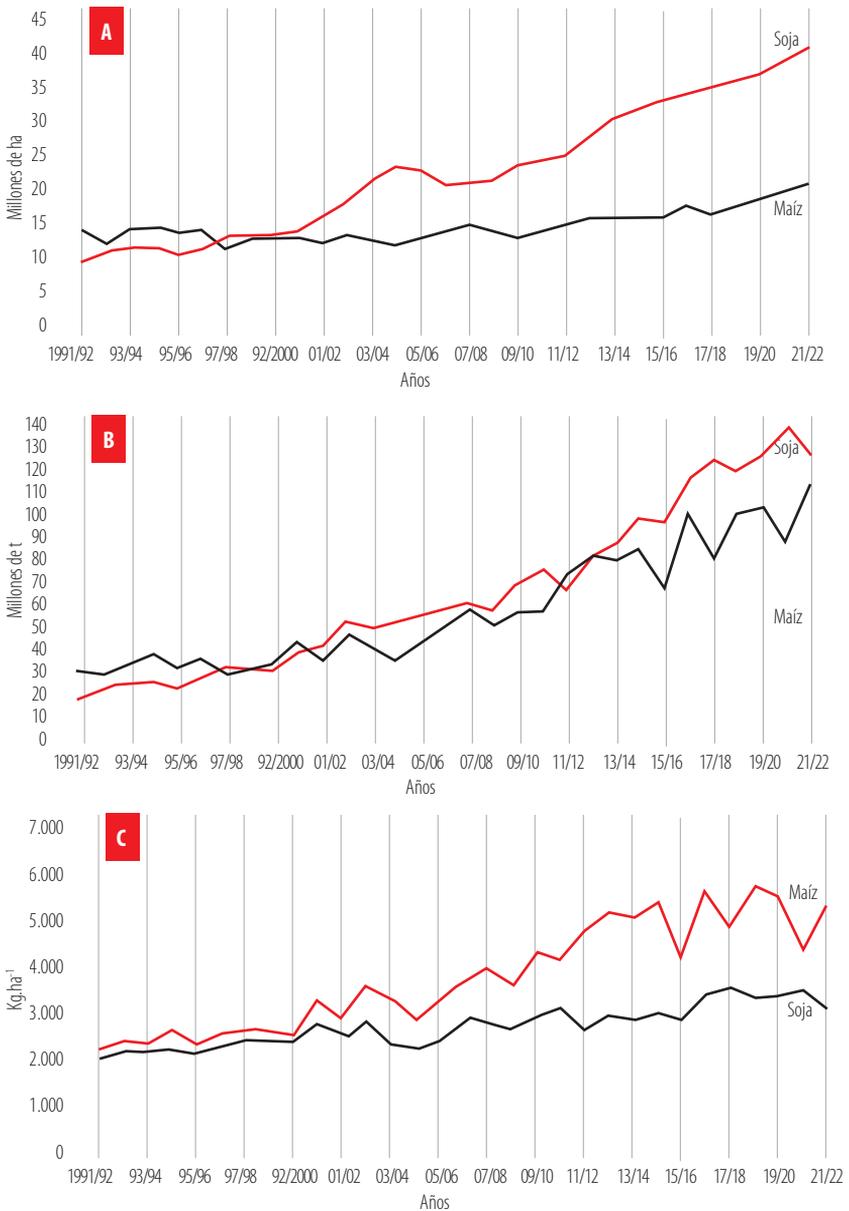


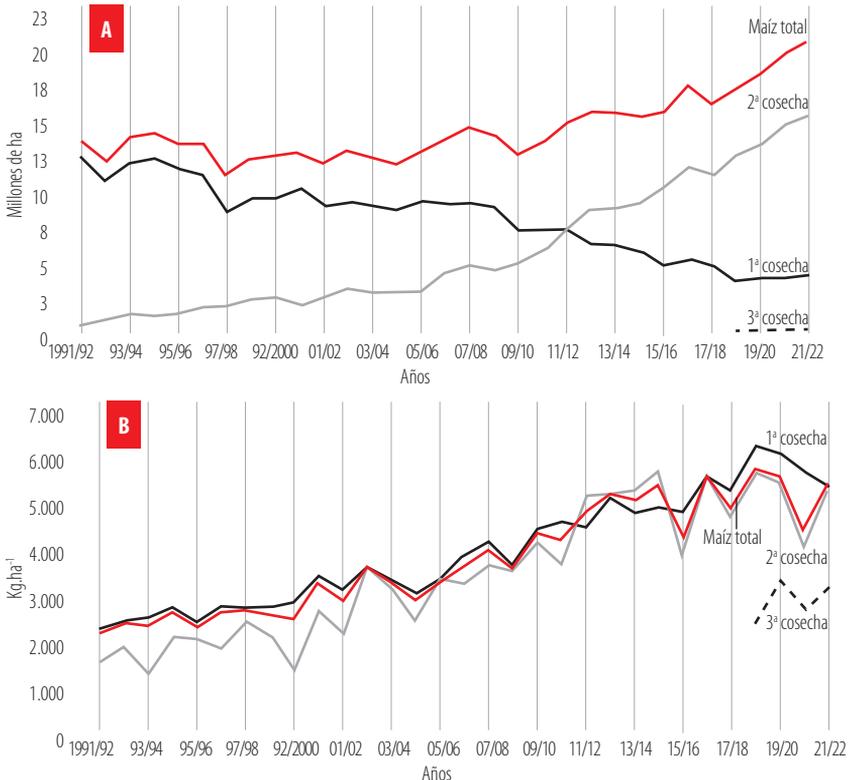
Figura 1. (A) Área de cultivo, (B) producción y (C) productividad de soja y maíz en Brasil durante 30 años.
Fuente: CONAB [2].

La productividad del maíz también creció en la medida en que el maíz se expandió en el área fuera de temporada, ya que los rendimientos económicos obtenidos con la soja permitieron al agricultor invertir en nuevas tecnologías para el sistema de producción.



Inicialmente, los beneficios fueron indirectos para el cultivo del maíz, cuando se aplicaron las más modernas técnicas e insumos al cultivo de la soja. Recientemente, ha existido la percepción de que las inversiones en maíz traen retornos económicos directos y también al sistema de producción en su conjunto (romper el ciclo de plagas y enfermedades en la soja, conservación/suministro de paja para SPD, control de malezas, mejor uso de maquinaria, infraestructura y personas, estructuración de suelos, entre otros), por lo que el cultivo del maíz continuará mostrando crecimientos en superficie, productividad y producción.

La Figura 2 muestra la dinámica del cultivo de maíz en Brasil en las últimas tres décadas, con crecimiento del área de cultivo de maíz en segunda cosecha y retracción de la primera cosecha (y también el surgimiento de una tercera cosecha –en el noreste del país– aún en sus inicios). La superficie cultivada con maíz safrinha pasó de alrededor de un millón de hectáreas en la campaña 1991/92 a más de 15 millones de hectáreas en 2021/22, lo que representa un aumento anual medio de alrededor del 48,2%. Por otro lado, hubo una disminución en el área sembrada con maíz en la primera cosecha, a razón de -2,1% anual, dando aún más espacio al cultivo de soja en este ciclo vegetativo. En el año agrícola 2011/12, hubo una inversión tanto en el área cultivada (Fig. 2, A) como en la producción bruta de maíz en el país (Fig. 2, C), y la contraestación pasó a ser más importante que la primera cosecha de maíz.



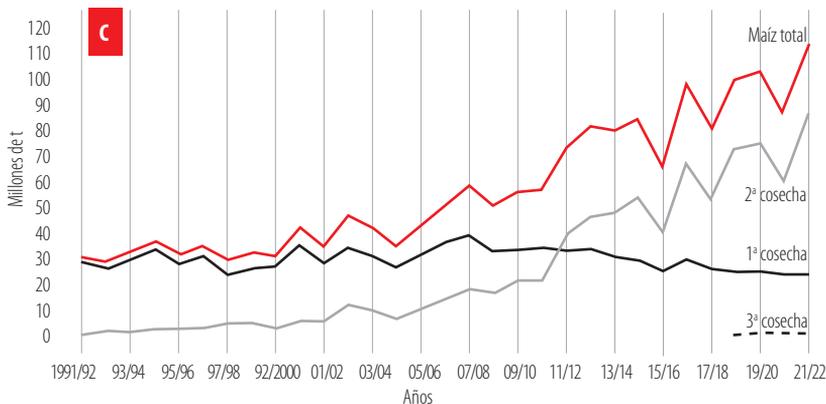


Figura 2. (A) Área de cultivo, (B) productividad y (C) producción de maíz, en Brasil, durante los últimos 30 años, para las temporadas de crecimiento de primera cosecha, segunda cosecha (safrinha) y tercera cosecha (cosecha del Nordeste). Fuente: CONAB [2].

La tasa de crecimiento general de la producción de grano de maíz en el periodo comprendido entre las zafas 1991/92 y 2021/22 fue de 8,6% anual (considerando todas las temporadas), sustentada básicamente por el aumento de la producción fuera de temporada, que mostró un crecimiento en el orden del 178% anual, pasando de aproximadamente 1,5 millones de toneladas a más de 86 millones de toneladas en este periodo. Por otro lado, hubo una retracción en la producción de maíz en la primera cosecha (-0,5% anual, en un periodo de 30 años). Los rendimientos medios de la contratemporada también fueron aumentando, con un aumento medio anual del 8,2%, mientras que en la primera cosecha el rendimiento mostró un menor ritmo de crecimiento, correspondiente al 4,5% anual (Fig. 2).

La región del Centro-Oeste y la producción de soja y maíz en Brasil

Artuzo y colaboradores (2019) presentaron un análisis histórico de la producción de maíz en Brasil durante cuarenta años [13], que trata de las diferencias entre tres periodos de producción, y demuestra el establecimiento de la mayor producción de este cereal en la región Centro-oeste del país, principalmente en el estado de Mato Grosso. La región del Centro-oeste está dominada por el bioma Cerrado y tiene la soja como su principal cultivo agrícola, por lo que el maíz se ha establecido como un segundo cultivo (safrinha), en la sucesión de la fabácea.

Es importante destacar que el movimiento “Conquista do Cerrado” provocó cambios en la estructura de la producción de maíz en Brasil. En el año agrícola 1991/92, Brasil cultivó un área equivalente a 14 millones de hectáreas de maíz, y cerca del 64% de esa área se encontraba en las regiones Sur y Sudeste (40% y 24%, respectivamente). La región Nordeste cultivó el 22%, mientras que la región Centro-oeste representó apenas alrededor del 11% del área cultivada de maíz en Brasil [2]. La región Norte era muy incipiente con solo el 3% del área cultivada en ese momento.



En el periodo de 30 años, se observó que el área cultivada con maíz en Brasil creció alrededor de 1,5 veces. En la campaña 2021/22, el área con este cultivo se estimó en aproximadamente 20,9 millones de hectáreas, con un cambio sustancial en relación a la distribución geográfica de la producción, con el 50% del área cultivada presente en el Centro-oeste de Brasil. Las regiones Sur y Sudeste perdieron importancia en este nuevo escenario, concentrando actualmente cerca del 20% y 11% de las áreas sembradas de maíz, respectivamente. La región Nordeste tiene el 14% de las áreas cultivadas y la región Norte continúa con baja expresión, con solo el 4,5% del área destinada a este grano. Se observa, entonces, que, en las últimas tres décadas, la región Centro-oeste de Brasil ha experimentado un crecimiento en el área de siembra de maíz del orden de siete veces, crecimiento basado en la adopción de conocimientos y tecnologías con el sistema de producción de maíz cultivado después de la cosecha de soja, sin necesariamente abrir nuevas áreas agrícolas (Tabla 1).

Mientras que el área cultivada de maíz en Brasil creció 1,5 veces en 30 años, la producción bruta de maíz creció 3,6 veces, pasando de 30,77 millones de toneladas a más de 112 millones de toneladas en el periodo considerado. Este crecimiento tuvo lugar a un ritmo más rápido en la región del Centro-oeste, con un aumento de 14 veces, de un nivel de 4,58 millones de toneladas a más de 64,5 millones de toneladas (Tabla 1).

Tabla 1. Datos generales de área, producción y productividad, por región, considerando todos los periodos de cultivo, para los años agrícolas 1991/92 y 2021/22, que representan 30 años de cultivo de maíz en Brasil.

Región		1991/92	2021/22	Proporción (%)
		Miles de ha		
Área cultivada	Norte	439	948	216
	Nordeste	3 095	2 985	96
	Centro-oeste	1 521	10 506	691
	Sudeste	3 297	2 268	69
	Sur	5 674	4 189	74
	Brasil	14 027	20 896	149
		Miles de toneladas		
Producción	Norte	642	3 902	608
	Nordeste	1 219	9 930	815
	Centro-oeste	4 588	64 543	1407
	Sudeste	8 317	12 992	156
	Sur	16 006	20 975	131
	Brasil	30 771	112 343	365
		(kg ha ⁻¹)		
Productividad	Norte	1 462	4 116	282
	Nordeste	394	3 327	844
	Centro-oeste	3 016	6 144	204
	Sudeste	2 522	5 728	227
	Sur	2 821	5 007	177
	Brasil	2 194	5 376	245

Fuente: CONAB [2].



Otra forma de demostrar la evolución del cultivo de maíz en Brasil, se analiza a continuación. La soja siempre ha sido el principal cultivo agrícola en la región del Cerrado, debido al mayor valor del grano, y el cultivo se concentraba en la temporada de verano (primera cosecha), por lo que el cultivo del maíz tuvo que adaptarse a las condiciones de fuera de temporada. En el año agrícola 1991/92, se utilizaron menos de un millón de hectáreas para el maíz safrinha; mientras que, en 2021/22 hay más de 15,77 millones de hectáreas, lo que representa un aumento de casi 16 veces en la safrinha en el periodo de 30 años. Este cambio expresivo fue impulsado por la región Centro-Oeste, que mostró un crecimiento de prácticamente 95 veces en el área de cultivos de segunda cosecha, pasando de 108 mil hectáreas en ese momento a más de 10 millones de hectáreas en la actualidad (Tabla 2).

Tabla 2. Representatividad de la contraestación (safrinha) en los años agrícolas 1991/92 y 2021/22, en referencia al total de área, producción y productividad*, con relación a la productividad media del maíz en Brasil.

	Región	1991/92	(%)	2021/22	(%)
Área Safrinha (miles de ha)	Norte	0	0	662	3,2
	Nordeste	295	2,1	1 230	5,9
	Centro-oeste	108	0,8	10 229	49,0
	Sudeste	283	2,0	1 078	5,2
	Sur	304	2,2	2 578	12,3
	Brasil (safrinha)	990	7,1	15 777	75,5
*Área total Brasil		14 027		20 895	
Producción Safrinha (miles de toneladas)	Norte	0	0	2 903	2,6
	Nordeste	89	0,3	2 464	2,2
	Centro-oeste	184	0,6	61 886	55,1
	Sudeste	598	1,9	5 778	5,1
	Sur	660	2,1	13 022	11,6
	Brasil (safrinha)	1 529	5,0	86 053	76,6
*Producción total Brasil		30 771		112 342	
Productividad Safrinha (kg ha-1)	Norte	-	-	4 386	81,6
	Nordeste	300	13,7	2 003	37,3
	Centro-oeste	1 699	77,4	6 050	112,5
	Sudeste	2 110	96,2	5 358	99,7
	Sur	2 170	98,9	5 052	94,0
	Brasil (safrinha)	1 544	70,4	5 454	101,5
*Productividad promedio en Brasil		2 194		5 376	

Fuente: CONAB [2].

Impresionantemente, el crecimiento de la producción de granos de maíz en el Centro-oeste, en los últimos 30 años, fue del orden de 336 veces, con estimaciones de cosecha de aproximadamente 62 millones de toneladas de maíz en la temporada baja 2021/22, en comparación con las 184 mil toneladas producidas en el año agrícola 1991/92. El volumen actual de fuera de temporada (safrinha) en Brasil representa el 76,6% de la producción total del país (que se estima en 86 millones de toneladas), y la región del Centro-oeste aporta el 55% de la producción de fuera de temporada [2].



Las regiones Sur y Sudeste también tienen contribuciones a la producción de granos en la temporada baja, representando el 11,6% y el 5,1%, respectivamente, del total de maíz producido en la safrinha 2021/22 en Brasil. Las regiones Norte y Nordeste muestran baja expresión en la contraestación, representando alrededor del 2,6% y 2,2%, respectivamente (Tabla 2), debido a limitaciones climáticas, tecnológicas y logísticas.

En la región del Centro-oeste, la productividad actual de maíz en contraestación (safrinha - estimada para la campaña 2021/22) supera los 6000 kg ha⁻¹, valor cerca de un 12,5% por encima de la media nacional (estimada en unos 5376 kg ha⁻¹) (Tabla 2). En esta región, además de las condiciones climáticas y topográficas relativamente favorables, también se desarrollaron y adaptaron sistemas de cultivo para lograr estos mayores rendimientos.

El movimiento de intensificación productiva también se observó en otras fronteras agrícolas emergentes, basadas en la soja y el cultivo de maíz fuera de temporada. Entre los principales frentes están las llamadas regiones MATOPIBA (que reúne áreas de los estados de Maranhão, Tocantins, Piauí y Bahia) y SEALBA (que reúne áreas de los estados de Sergipe, Alagoas y Bahia). Estas dos regiones están elevando los niveles de producción de granos y las áreas antes consideradas marginales para la agricultura en el norte y noreste de Brasil, trayendo nuevas oportunidades para el emprendimiento y el desarrollo socio productivo.

Tipos de cultivares y transgénicos

Entre las diversas tecnologías adoptadas en el sistema de producción de Brasil donde se inserta el maíz, no se puede dejar de destacar la velocidad de adopción de híbridos con tecnologías transgénicas para el control de insectos plagas y con tolerancia a herbicidas. Parentoni *et al.* (2013) [14] abordan este tema y reportan que los transgénicos de maíz fueron adoptados por primera vez en Brasil en la zafra 2008/2009. En ese momento, 19 híbridos transgénicos (de 321) estaban disponibles, lo que representaba aproximadamente el 6% en el año del lanzamiento de la tecnología.

En la cosecha 2020/21, Pereira Filho y Borghi (2021) [15] informan que más del 75% de los híbridos de maíz disponibles en el mercado brasileño de semillas tenían tecnologías transgénicas. Actualmente, se dispone de híbridos con 11 tipos de combinaciones de genes, la mayoría piramidales, para el control de orugas, plagas de la parte aérea de la planta (con diferentes mecanismos de acción), para el control de plagas del suelo, y para tolerancia a herbicidas.

La tasa de adopción de transgénicos en la pretemporada de 2021 superó el 90% en relación al área destinada al maíz, con cerca de 12,6 millones de hectáreas cultivadas con híbridos de maíz con alguna tecnología transgénica, en un total de 13,7 millones de hectáreas en la safrinha de 2021 [2]. En la primera cosecha de maíz, la tasa de uso de transgénicos fue inferior a la de la contraestación, representando el 82%, lo que equivale a un área de aproximadamente 5,3 millones de hectáreas [15].

Además de ser modificados genéticamente, la mayoría de los cultivares disponibles son del tipo híbrido simple, que tienen mayor potencial productivo y un ciclo temprano, para una mejor adaptación a condiciones de restricción hídrica en cultivos fuera de estación (después de la cosecha de soja) [15]. La alta tasa de adopción de híbridos



simples, transgénicos y de ciclo temprano en contratiempo, en relación a la primera cosecha (primavera/verano), evidencia la mayor inversión en cultivos de maíz en sistemas productivos donde la soja es el componente principal.

Mayor sostenibilidad en sistemas productivos intensificados

Desde mediados de la década del 2000, y más acentuadamente después de la campaña 2011/12, cuando la superficie y la producción de maíz safrinha superaron los respectivos valores (superficie y producción) de la primera cosecha de este cereal, no es posible disociar los avances tecnológicos de los cultivos de soja y maíz en Brasil.

El binomio soja-maíz se ha convertido en un elemento fundamental para aumentar la eficiencia de la producción agrícola e impulsar varias otras tecnologías que permiten una mayor sostenibilidad de los sistemas de producción intensivos, como el intercalado con forrajes (principalmente *Brachiaria*), los sistemas de integración cultivo-ganadería-bosque (ILPF por sus siglas en portugués y sus variantes: ILP-*Integração Lavoura Pecuária* e ILF-*Integração Lavoura Floresta*). La introducción de *Brachiaria* (y otros cultivos forrajeros o de cobertura) proporciona una mayor fijación de carbono en los sistemas agrícolas y se logra una mayor inmovilización de este elemento en los sistemas de producción que utilizan componentes arbóreos, con grandes efectos en la agenda de mitigación de los problemas relacionados por la emisión de gases de efecto invernadero de las cadenas productivas.

Con el uso de tecnologías y manejos que toman en cuenta las buenas prácticas agrícolas, basadas en la aplicación del conocimiento científico para la producción en suelos y climas tropicales, Brasil ha demostrado cada vez más que los granos (principalmente soja y maíz) se producen en grandes cantidades, a gran escala, de manera sostenible (económica y ambientalmente), de manera que se produzcan dos cosechas de granos en una misma zona, y en algunos casos una tercera cosecha para el ganado de engorde, dentro de un mismo año agrícola.

Los sistemas de producción intensificada, donde la safrinha de maíz es un componente clave, tienen un claro y significativo efecto de ahorro de tierras, al no requerir la expansión territorial sobre áreas de vegetación nativa para aumentar la producción y productividad de cultivos agrícolas y producción de carne. En este sentido, la mayor parte del tiempo, la expansión de las fronteras agrícolas se da sobre áreas de pastos degradados, incorporándolos a los sistemas de producción de granos a través de la recuperación de la capacidad de retención de agua, corrección de la acidez del suelo y mejoramiento de la fertilidad, con el fin de expandir la capacidad productiva y la rentabilidad de los sistemas agrícolas.

Los datos de la NASA también permiten verificar que, a pesar de las grandes dimensiones de las áreas destinadas a la producción agrícola y ganadera en Brasil, el país conserva más del 66% del territorio con vegetación nativa. Los cinco grandes biomas brasileños (Amazonas, Cerrado, Caatinga, Mata Atlántica y Pampa) presentan áreas de preservación de flora, fauna y recursos naturales (agua y minerales) en dimensiones y proporciones superiores a la mayoría de los países del mundo. La legislación brasileña también establece los límites mínimos para la preservación de áreas de vegetación nativa dentro de las propiedades rurales, de acuerdo con el Código Forestal (Ley nº



12.651, del 25/05/2012), y el gobierno utiliza el Registro Ambiental Rural (CAR) como uno de las herramientas para el control y seguimiento electrónico del uso del suelo. Brasil es un país de dimensiones continentales (supera Australia en área) y del área total conservada (dos tercios de su superficie) más del 26% del total del territorio nacional tiene vegetación nativa dentro de propiedades rurales privadas. Estos hechos refuerzan la importancia de utilizar tecnologías para intensificar los sistemas productivos, aumentando la productividad por área, sin necesidad de abrir fronteras agrícolas.

Sistemas de fertilización y construcción de la fertilidad del suelo

Los avances hacia sistemas de producción intensivos requieren de insumos que permitan, más que obtener una alta productividad, la sostenibilidad del sistema, en las dimensiones económica, ambiental y social. Los fertilizantes químicos son insumos importantes para la intensificación de los sistemas de producción de granos, pero es necesario planificar y gestionar su uso para obtener un mayor aprovechamiento de los sistemas agrícolas, no solo de los cultivos.

Los datos de importación de fertilizantes durante las últimas tres décadas demuestran cuán dependientes son los sistemas agrícolas de estos insumos. En 1991, el consumo de fertilizantes en Brasil fue de alrededor de 3,2 millones de toneladas [16], mientras que en 2021 se importaron 24,83 millones de toneladas [17]. Esto representa un crecimiento de alrededor del 770% en la tasa de uso de fertilizantes (considerando todo el consumo en Brasil, no solo el maíz y la soja).

La construcción de la fertilidad del suelo representa una evolución en el manejo de sistemas de producción más intensificados y proporciona ganancias en la eficiencia de la fertilización. La respuesta de los cultivos y los rendimientos económicos están influenciados por los niveles de acidez del suelo, las existencias de nutrientes y materia orgánica, y la capacidad de amortiguación del suelo, entre otros factores. La corrección de la acidez y el manejo de la fertilización deben realizarse no solo para reponer los nutrientes exportados (vía cosechas), o perdidos por otras vías en el sistema, sino también teniendo en cuenta las características texturales, físicas y químicas de los suelos, y las interacciones y dinámica de los nutrientes, buscando el equilibrio en la disponibilidad de los mismos para el mantenimiento de un alto potencial productivo. Un buen manejo de suelos con fertilidad acumulada permite optimizar el uso de fertilizantes y aumentar la rentabilidad de los sistemas productivos a mediano y largo plazo [18].

Bioinsumos

El gobierno brasileño, a través del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Abastecimiento, instituyó el Programa Nacional de Bioinsumos y el Consejo Estratégico del Programa Nacional de Bioinsumos, a través del Decreto 10.375, de 26 de mayo de 2020 [19], con el objetivo de ampliar y fortalecer el uso de bioinsumos para promover un desarrollo más sostenible de la agricultura brasileña.

Fomentar una producción con mayor sustentabilidad, de forma más amigable con el hombre y la naturaleza, hace que la tasa de uso de bioinsumos crezca aproximadamente un 28% anual [20]. Este hecho impulsa no solo la agricultura en Brasil, sino también una



nueva industria emergente y rentable, que se basa en la producción de bioinsumos para un gigantesco mercado agropecuario y cadenas productivas asociadas.

Para el maíz, que tiene sembradas aproximadamente 20 millones de hectáreas cada año en Brasil, se destacan los productos de base biológica para el control de plagas (bioinsecticidas e insectos benéficos, enemigos naturales de las plagas) e inoculantes, que brindan mayor eficiencia en el uso de los nutrientes, como el P, y estimulantes del crecimiento vegetal, así como protectores frente a estreses abióticos, como la sequía y otros factores adversos.

La investigación pública brasileña también juega un papel importante en la identificación de microorganismos, insectos, moléculas, enzimas y compuestos, para formar la base para el desarrollo (o co-desarrollo) de diversos bioinsumos [21]. Estos bioproductos permiten la sustitución de insumos químicos (muchas veces tóxicos) constituyendo soluciones más sustentables para los sistemas productivos modernos.

Política agrícola para minimizar el riesgo en la producción

La Zonificación Agrícola de Riesgo Climático (ZARC) fue instituida por el Ministerio de Agricultura de Brasil [22], con el objetivo de mapear e identificar momentos de menor riesgo climático (eventos adversos al cultivo agrícola) para la conducción de cultivos, considerando el ciclo del cultivo, tipos de suelos, sus capacidades de retención de agua, y datos climáticos históricos (en décadas), a nivel municipal, para varios cultivos agrícolas, incluido el maíz.

La ZARC es un instrumento de política agrícola y de gestión de riesgos en la agricultura y está asociada al acceso al crédito y al seguro agrícola, proporcionando indicadores de épocas de cultivo que presentan un menor riesgo de malas cosechas y, por tanto, su adopción permite mejores garantías de rendimientos satisfactorios para un mejor retorno de la inversión en la agricultura.

Para el maíz, las ordenanzas se publican cada año, por temporada de crecimiento (primera y segunda cosechas), relacionando cada cultivar disponible en el mercado brasileño con sus regiones de indicación. Las ordenanzas cobran especial importancia en la condición del cultivo del maíz en la contratemporada, ya que es en esta época cuando hay menor frecuencia y volumen de lluvias, por lo que las indicaciones de épocas y regiones de menor riesgo, permiten mayor seguridad a los agricultores. Este mecanismo también permite la identificación de regiones y épocas que no son aptas para el cultivo, con el fin de evitar pérdidas.

Antecipe - tecnología disruptiva para la siembra de maíz de la safrinha antes de la cosecha de soja

El sistema *Antecipe* [23] es un sistema disruptivo de producción de granos, que agrega un conjunto de activos tangibles e intangibles (tecnologías/conocimientos relacionados con la ecofisiología de cultivos, manejo de sistemas de producción, máquinas y aplicaciones) con el potencial de promover impactos importantes para el sector productor de granos y cadenas asociadas, y con expectativas de gran crecimiento en los próximos años, destacando las ganancias productivas en maíz de contraestación.



La base de este sistema disruptivo moderno, que promueve el aumento de la productividad en sistemas ya intensificados, es el acceso a una ventana de cultivo más favorable al segundo cultivo, al anticipar su implementación, incluso antes de la cosecha del primer cultivo (soja). Para el desarrollo del sistema *Antecipe*, que aboga por la intercalación temprana de maíz (u otros cultivos) entre las líneas de soja, se realizaron varios estudios durante más de diez años, acumulando conocimientos y prácticas basadas en las etapas fisiológicas del maíz y la soja. Con los resultados de esta investigación pionera, se identificó que la siembra de maíz entre las líneas de soja, hasta 20 días antes de la cosecha de la fabácea (etapa reproductiva R5 de la soja), permite que el maíz esté, como máximo, en la etapa vegetativa V4/V5, en el momento de la cosecha de soja, de modo que el punto de crecimiento del maíz aún esté debajo o cerca de la superficie del suelo. En esta situación, la operación de cosecha de soja, con automóviles, corta la fabácea y también parte de las hojas de las plántulas de maíz en el campo, sin perjudicar el rendimiento del cultivo del cereal; debido a que el punto de crecimiento queda por debajo del corte hecho por la cosechadora. De esta forma, la planta de maíz emitirá hojas nuevas y continuará su crecimiento y desarrollo con normalidad.

Con la siembra temprana, el cultivo sembrado en la segunda cosecha tiene acceso a una mayor cantidad de agua, debido a que la segunda cosecha accede a la lluvia en un momento más favorable, que si se implementara después de la cosecha de soja.

El sistema *Antecipe* fue diseñado con base a un conjunto de conocimientos sobre ecofisiología de cultivos (principalmente soja y maíz, pero está en proceso de ajuste para otros cultivos secuenciales), climatología, riesgo climático (ZARC) y maquinaria agrícola que permite la siembra intermedia de la segunda cosecha, sin afectar la cosecha de soja que falta por recoger. Existe una patente de máquina y una solución informática, a través de una aplicación para dispositivos móviles, que permite la planificación y seguimiento para la toma de decisiones y la gestión más adecuada de este complejo sistema (dos cultivos conviviendo).

Esta solución, que reúne diversos conocimientos científicos y tecnológicos, es un ejemplo más de la contribución de la investigación agrícola pública en Brasil, que permitirá incremento de rendimientos, mayores retornos económicos y mayor sostenibilidad de los sistemas de producción, especialmente para el maíz en la segunda cosecha. También trae oportunidades para el emprendimiento en la asociación público-privada, generando empleos e ingresos.

CONCLUSIÓN

El cultivo de maíz ha experimentado importantes avances en superficie cultivada, productividad y producción bruta en los últimos 30 años. La necesidad de mayores inversiones en el cultivo de soja (más rentable que el maíz) generó varios avances tecnológicos que, con el tiempo, consolidaron al maíz como un cultivo fundamental para aumentar la productividad y la sostenibilidad de los sistemas de producción de granos en Brasil. El proceso de intensificación productiva de las áreas agrícolas permitió la producción del cereal en segunda cosecha (o fuera de temporada) y provocó una reestructuración de la matriz productiva, de manera que la región Centro-oeste, antes



considerada no apta para la agricultura, se convirtió en el productor de granos más importante del país, entre los que destacan la soja y el maíz.

Algunos marcos legales, como la ley de protección de cultivos, también fueron muy importantes para el establecimiento de las condiciones para las inversiones en el sector agrícola y las nuevas tecnologías emergentes permitirán la continuidad de las ganancias en productividad y producción bruta, de manera aún más sostenible.

Hoy, Brasil produce 3,6 veces más granos de maíz que a principios de la década de 1991, con cerca de 112 millones de toneladas, contra 30,7 millones de toneladas en ese momento. A pesar del aumento masivo de la producción bruta, el área cultivada aumentó solo 1,5 veces, de 14 a 20,8 millones de hectáreas. Esto demuestra que, para el maíz, el gran incremento se dio en el rendimiento, que pasó de aproximadamente 2,2 a 5,3 t ha⁻¹, lo que representa un aumento de la productividad de 2,5 veces.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Red Latinoamericana del Maíz y al proyecto Tech Maíz del Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED) por la gestión para la publicación de este artículo. Se agradece además a José Luis Zambrano del INIAP (Ecuador) por la traducción del manuscrito al español.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Lauro J. M. Guimarães y Frederico O. M. Durães concibieron la elaboración del artículo. Junto con el resto de autores realizaron la investigación bibliográfica, analizaron la información y desarrollaron el texto. Todos los autores revisaron críticamente el contenido intelectual del manuscrito. Lauro J. M. Guimarães elaboró las figuras 1 y 2.

CONFLICTO DE INTERÉS

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

REFERENCIAS

- [1] Food and Agriculture Organization of the United Nations - FAO. (2022). FAOSTAT statistical database. Rome :FAO. Recuperado el 24 de febrero de 2022 de: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>
- [2] Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB. (2022). Acompanhamento da safra brasileira de grãos, safra 2021/22, fevereiro 2022: quinto levantamento. Brasília, DF: CONAB. Recuperado el 11 de febrero de 2022 de: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safra/safra/gaos>
- [3] Vidal, M. V. S. (2015). Inovação na agricultura brasileira: a contribuição da Embrapa na conquista do cerrado pela soja. Recuperado el 17 de enero de 2022 de: <https://www.acervodigital.ufpr.br/handle/1884/41722>
- [4] Campelo, G. J. de A., Kiihl, R. A. y De Almeida, L. A. (1998). Soja: desenvolvimento e seleção de germoplasma para regiões de baixas latitudes. Embrapa Meio-Norte-Documents (INFOTECA-E). Recuperado el 24 de enero de 2022 de: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/57032>
- [5] Duarte, J. de O., Garcia, J., Matoso, M. y Santana, D. (2007). Avaliação dos impactos econômicos, sociais e ambientais da cultivar de milho BR 201 na safra 2005/2006. Embrapa Milho e Sorgo-Documents (INFOTECA-E). Recuperado el 25 de enero de 2022 de: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/486194>
- [6] Vasconcellos, R. C. C., Mendes, F. F., Oliveira, A. C., Guimarães, L. J. M., Albuquerque, P. E. P., Pinto, M. O., Barros, B. A., Pastina, M. M., Magalhaes, J. V. y Guimaraes, C. T. (2021). *ZmMATE1* improves grain yield and yield stability in maize cultivated on acid soil. *Crop Science*, 61: 1-10. doi: <https://doi.org/10.1002/csc2.20575>
- [7] Brasil (1997^a). Lei Nº 9.456, de 25 de abril de 1997. Regulamento. Institui a Lei de Proteção de Cultivares e dá outras providências. Recuperado el 18 de enero de 2022 de: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19456.htm
- [8] Brasil (1997^b). Decreto Nº 2.366, de 5 de novembro de 1997. Regulamenta a Lei nº 9.456, de 25 de abril de 1997, que institui a Proteção de Cultivares, dispõe sobre o Serviço Nacional de Proteção de Cultivares - SNPC, e dá outras providências. Recuperado el 18 de enero de 2022 de: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1997/d2366.htm
- [9] Rodrigues, J. A. P. (2017). A lei de proteção de cultivares (LPC). *AgroANALYSIS*, 37(1): 38-43.
- [10] Motter, P. & Almeida, H.G. (2015). Plantio direto: A tecnologia que revolucionou a agricultura brasileira. *Faz do Iguacu: Parque Itaipu*, p. 144. Recuperado el 28 de enero de 2022 de: <https://www.farmnews.com.br/mercado/consumo-de-fertilizantes-no-brasil>
- [11] Fernandes, C. H. S., Tejo, D. P. y Arruda, K. M. A. (2019). Desenvolvimento do Sistema de Plantio Direto no Brasil: Histórico, Implantação e Culturas Utilizadas. *Uniciências*, 23(2): 83-88. Recuperado el 25 de enero de 2022 de: <https://revista.pgskroton.com/index.php/uniciencias/article/view/6466>
- [12] Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB. (2020). Acompanhamento da safra brasileira de grãos, safra 2020/21, novembro 2020: segundo levantamento. CONAB. Recuperado el 14 de enero de 2022 de: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safra/safra/gaos>
- [13] Artuzo, F. D., Foguesatto, C. R., Machado, J. A. D., De Oliveira, L. y De Souza, Â. R. L. (2019). O potencial produtivo brasileiro: uma análise histórica da produção de milho. *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente*, 12(2): 515-540. Recuperado el 18 de enero de 2022 de: <https://periodicos.unicesumar.edu.br/index.php/rama/article/view/5327>
- [14] Parentoni, S. N., Miranda, R. A. y Garcia, J. C. (2013). Implications on the introduction of transgenics in Brazilian maize breeding programs. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 13: 9-22. Recuperado el 18 de enero de 2022 de: <https://www.scielo.br/j/cbab/a/j4XCSyKYF4WBcZkz6yPgQhP/?lang=en#>
- [15] Pereira-Filho, I. A. y Borghi, E. (2021). Levantamento de cultivares de milho para o mercado de sementes: safra 2020/2021. Embrapa Milho e Sorgo-Documents (INFOTECA-E). Recuperado el 18 de enero de 2022 de: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1133681>
- [16] Alves, E. R. de A., Contini, E. y Gasques, J. G. (2008). Evolução da produção e produtividade da agricultura brasileira. Área de Informação da Sede-Capítulo em livro científico (ALICE). Recuperado el 24 de enero de 2022 de: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/1061204/1/EvolucaoDaProducao.pdf>
- [17] FARMNEWS (2021). Consumo de fertilizantes no Brasil em 2021 nunca foi tão alto: confira dados. Recuperado el 26 de enero de 2022 de: <https://www.farmnews.com.br/mercado/consumo-de-fertilizantes-no-brasil/>



- [18] De Resende, A. V., Fontoura, S. M. V., Borghi, E., Dos Santos, F. C., Kappes, C., Moreira, S. G., *et al.* (2016). Solos de fertilidade construída: características, funcionamento e manejo. *Embrapa Milho e Sorgo-Artigo em periódico indexado (ALICE)*. Recuperado el 10 de febrero de 2022 de: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/1070008/1/Solosfertilidade1.pdf>
- [19] Brasil (2020). Decreto Nº 10.375, de 26 de maio de 2020. Institui o Programa Nacional de Bioinsumos e o Conselho Estratégico do Programa Nacional de Bioinsumos. Recuperado el 24 de enero de 2022 de: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/decreto-n-10.375-de-26-de-maio-de-2020-258706480>
- [20] EBC (2021). Uso de bioinsumos cresce cerca de 28% ao ano no Brasil. *Brasil Rural*. Recuperado el 25 de enero de 2022 de: <https://radios.ebc.com.br/brasil-rural/2021/10/o-uso-de-bioinsumos-no-brasil-tem-crescido-em-torno-de-28-ao-ano>
- [21] Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA (2022). *Portfolio Insumos Biológicos*. Recuperado el 10 de enero de 2022 de: <https://www.embrapa.br/portfolio/insumos-biologicos>
- [22] Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – MAPA (2022). *Zoneamento Agrícola*. Recuperado el 18 de enero de 2022 de: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/riscos-seguro/programa-nacional-de-zoneamento-agricola-de-risco-climatico/zoneamento-agricola>
- [23] Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA (2022). *Sistema Antecipe*. Recuperado el 26 de enero de 2022 de: <https://www.embrapa.br/sistema-antecipe>

Tecnologías para el cultivo de maíz (*Zea mays*. L) en el Ecuador

Mario Caviedes^{1*}, Francisco E. Carvajal-Larenas¹, José L. Zambrano²

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

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

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

Generation of technologies for the cultivation of corn (*Zea mays*. L) in Ecuador

Resumen

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura FAO reporta una superficie cosechada del maíz en el Ecuador de 365.334 ha con un rendimiento de 4,58 toneladas por hectárea ($t\ ha^{-1}$) y una producción de 1.479.700 toneladas (t). Estas cifras demuestran la importancia del cultivo del maíz en el país, cuya producción está orientada principalmente a la alimentación humana y animal. En el Ecuador, tienen un rol importante las investigaciones relaciones con el mejoramiento genético, la nutrición vegetal, la fitopatología y la entomología; mientras que es incipiente el uso de la biotecnología y sus aplicaciones para incrementar la productividad del cultivo. Los avances en el mejoramiento genético han sido uno de los factores más importantes para mejorar la productividad del cultivo en las dos regiones productoras más importantes del país (Costa y Sierra). El objetivo del presente artículo es describir el aporte de los resultados de la investigación y las tecnologías generadas en el país para una producción mas rentable y sostenible del maíz, y que contribuye a mejorar la seguridad alimentaria de los ecuatorianos.

Palabras clave: Agronomía, Biotecnología, Fitomejoramiento, Productividad, Rentabilidad

Abstract

The Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) reports a corn harvested area in Ecuador of 365,334 ha, with a yield of 4.58 tons per hectare ($t\ ha^{-1}$), and a production of 1,479,700 tons (t). These data demonstrate the importance of corn cultivation in the country, whose production is mainly oriented towards human consumption and animal feed. In Ecuador, research related to plant breeding, plant nutrition, plant pathology, and entomology plays an important role; while the use of biotechnology and its applications to increase crop productivity is incipient. Advances in plant breeding have been one of the most important factors to improve crop productivity in the two most important corn-producing regions of the country (Costa and Sierra). The objective of this article is to describe the contribution of science and technology generated in the country for a profitable and sustainable corn production.

Keywords: Agronomy, Biotechnology, Plant breeding, Productivity, Profitability.



Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /
Edited by:
Gabriela Albán

Recibido /
Received:
04/02/2022

Aceptado /
Accepted:
04/04/2022

Publicado en línea /
Published online:
16/05/2022



INTRODUCCIÓN

Las estadísticas de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) reportan en Ecuador una superficie cosechada de maíz de 365.334 hectáreas (ha), con un rendimiento promedio de 4,58 toneladas por hectárea ($t\ ha^{-1}$) y una producción de 1.479.700 toneladas (t) [1]. A pesar del incremento de rendimiento de grano en los últimos años, los productores de maíz demandan nuevas tecnologías y una mayor integración entre los diversos actores de la cadena productiva con la industria y consumidores finales.

En el Ecuador, en la región Sierra, el maíz se caracteriza por su gran diversidad de tipos, colores, texturas y formas; así como también, por un sostenido incremento en el consumo directo en grano seco y choclo. Una de las principales limitantes del cultivo en la Sierra es su bajo rendimiento, con $1,63\ t\ ha^{-1}$ en grano seco. En la región Costa o Litoral, predomina el cultivo de maíz amarillo duro para la industria de alimentos balanceados y en un pequeño porcentaje el tipo blanco duro, que está orientado para consumo humano en fresco (choclo). La producción y productividad del maíz amarillo duro en la región Litoral o Costa y en la Amazonía se ha incrementado en los últimos años debido a una mayor tecnificación, lo que ha permitido reducir las importaciones de maíz y que el país cubra aproximadamente entre el 85 y 90% de sus necesidades de grano; especialmente del sector avicultor. Estos incrementos no hubieran sido posibles sin el aporte de las innovaciones realizadas en los campos del mejoramiento genético, con el desarrollo de variedades e híbridos de alto potencial de rendimiento, y en la agronomía del cultivo, incluyendo aspectos de labranza, densidad de siembra, fertilización, control integrado de insectos, plagas y enfermedades, riego y mejora en los procesos de cosecha y poscosecha.

Por otra parte, la producción de maíz suave o amiláceo que se produce en la Sierra, cuya superficie sembrada corresponde a 74.018 ha, en altitudes sobre los 2.000 m s.n.m., ha tenido un menor desarrollo tecnológico, que a pesar de haber incrementado su rendimiento en los últimos años, éste sigue siendo bajo [2, 3].

El objetivo del presente artículo es describir el aporte tecnológico y el conocimiento generado por las instituciones públicas y privadas del país, incluida la academia, que han contribuido a una producción más rentable y sostenible del maíz; aportando a la mejora de la seguridad alimentaria de los ecuatorianos

TECNOLOGÍAS PARA INCREMENTAR LA PRODUCTIVIDAD DEL MAÍZ

El cambio climático con sus efectos en la producción y productividad agrícola, especialmente con lo relacionado a las modificaciones de los regímenes de lluvia, la sequía, el exceso de humedad y la redistribución geográfica de insectos plaga y enfermedades, son aspectos que generan nuevos retos en la generación y desarrollo de nuevas técnicas para la producción de maíz, debido a que se requieren tecnologías que incrementen el rendimiento y adaptabilidad a múltiples ambientes y tolerancia y/o resistencia a los diversos estreses bióticos y abióticos que afectan al cultivo.



Además de la genética, la agronomía es clave para incrementar el rendimiento del cultivo de maíz. En Ecuador, son frecuentes las investigaciones relacionadas con nutrición vegetal, fitopatología y entomología, mientras que el uso de la biotecnología y de sus aplicaciones para incrementar la productividad del cultivo es incipiente.

Nutrición vegetal

El nitrógeno (N) es el principal nutriente que requiere el cultivo de maíz y es uno de los más estudiados por su alta movilidad dentro del suelo [4, 5]. En los últimos años se ha investigado el requerimiento de macronutrientes (N, P, K, Mg, S) en varios híbridos de maíz amarillo duro en la Costa, utilizando curvas de absorción. Las curvas de absorción permiten determinar las épocas de mayor demanda de nutrientes de los cultivos durante su desarrollo vegetativo [6]. Carrillo y colaboradores identificaron que el cultivo de maíz incrementa la absorción de N a partir de los 30 días de siembra hasta los 100 días (floración femenina empezó a los 55 días), absorbiendo alrededor de 180 kg ha⁻¹ de N durante la época lluviosa (temporal) y 140 kg ha⁻¹ de N durante la época seca (sin riego, con humedad remanente del suelo) [7]. Otro estudio determinó que la dosis óptima de N para la producción de un híbrido de maíz bajo riego es de 200 kg ha⁻¹ de N [8].

En Ecuador se ha estudiado también la técnica de Manejo de Nutriente por Sitio Específico (MNSE). Esta técnica permite compensar el déficit entre la cantidad de nutrientes que requiere el cultivo y la que existe en el suelo; para lo cual, se instalan parcelas que se fertilizan con todos los nutrientes (fertilización completa) y se compara el comportamiento del maíz con las parcelas en las que se omitió un nutriente (parcelas de omisión) [9]. Las recomendaciones que se generan son específicas para cada localidad y tipo de manejo. Por ejemplo, para la principal zona productora de maíz en la Sierra (provincia de Bolívar, cantones de Guaranda, Chimbo y San Miguel), se determinó que el cultivo (variedades de libre polinización) requiere de al menos 100 kg ha⁻¹ de N fraccionado en tres aplicaciones, ajustando la dosis con el uso de tablas de colores o medidores de clorofila a medida que se desarrolla el cultivo [10]. El MNSE ha sido empleado además para evaluar el efecto de la omisión de nutrientes en la producción de semilla híbrida de maíz en Mocahe, provincia de Los Ríos [11].

El uso de técnicas nucleares (isótopos) ha sido utilizada para evaluar la eficiencia de la recuperación del N en la incorporación de abonos verdes y en el fraccionamiento de la aplicación de N. Utilizando urea marcada con N¹⁵ y abonos verdes en maíz de valles altos (Sierra), se determinó que la incorporación de chocho (*Lupinus mutabilis*) incrementa la biomasa en el cultivo de maíz, que alcanzó el mayor rendimiento con una dosis de 135 kg ha⁻¹ de N, fraccionando la urea en tres aplicaciones: a la siembra, 45 días y 75 días después de la siembra [4].

Desde hace poco tiempo se evalúan técnicas de fertilización líquida en maíz para incrementar la eficiencia en el uso de N, sobre todo en zonas sometidas a estrés hídrico. La fertilización líquida (en *drench* o inyectada al suelo) se muestra como una tecnología eficiente de nutrición cuando las condiciones ambientales no proporcionan la humedad de suelo suficiente para que los fertilizantes tradicionales (granulados) se disuelvan de forma adecuada. Cedeño y colaboradores reportaron



incrementos en la producción de grano de maíz de entre 13 y 43% utilizando fertilización líquida, en comparación con la aplicación de urea granulada en banda a un costado del surco [12].

En el país se desarrollan también productos biológicos que incrementan el rendimiento del cultivo o la eficiencia en el uso de los nutrientes. El Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP) ha generado un biofertilizante experimental a base de bacterias promotoras de crecimiento, capaces de aumentar en 21 y 42% la absorción de N y fósforo (P), respectivamente, en relación con el testigo sin inocular [13]. Evaluaciones de este biofertilizante mostraron un incremento en el rendimiento de grano de hasta 30%, con una reducción de alrededor del 20% en los costos de producción, debido al ahorro del 50% de la fertilización convencional recomendada para el cultivo [14]. El uso de azolla (*Azolla* spp) como biofertilizante en maíz es otra tecnología que se ha investigado en el país. El Azolla es un helecho que crece en agua y tiene la característica de asociarse con cianobacterias, especialmente con anabaena (*Anabaena azollae* Strass.), y de esta manera fijar nitrógeno de la atmósfera. Vásquez reportó que el uso de azolla y biol incrementaron significativamente el rendimiento de grano de un híbrido de maíz en 17%, en comparación al testigo [15]. Otro estudio reportó que el uso de azolla seco (deshidratado) incrementó el porcentaje de nitrógeno y materia seca en plantas de maíz cultivadas en macetas [16]. El uso de biofertilizantes y azolla en el cultivo de maíz en Ecuador es incipiente debido a la poca disponibilidad de estos productos.

Fitopatología

Existen varios documentos que describen los organismos causales, sintomatología y manejo de las enfermedades de maíz en el Ecuador [17-19]. Por ejemplo, en un estudio reciente, se reportó que las principales enfermedades que afectan el cultivo del maíz en el país son: tizón foliar (*Exserohillum turcicum*), mancha foliar (*Helminthosporium turcicum* o *Curvularia lunata*), roya común (*Puccinia sorghi*), carbón común (*Ustilago maydis*), mancha de asfalto (*Phyllachora maydis*, *Monographella maydis*, *Coniothyrium phylachorae*) mancha gris de la hoja (*Cercospora zea-maydis*), pudrición del tallo (*Dickeya zea*, *Erwinia* spp) pudrición de la mazorca (*Fusarium* spp, *Stenocarpella maydis*, *Diploidia maydis*, *Gibberella zea*) y cinta roja (*Spiroplasma kunkellii*); así como varios virus [20].

Las enfermedades virales necrosis letal del maíz y rayado fino del maíz, este último causado por *Maize rayado fino virus* (MRFV), son las que más daño han ocasionado en el país, aunque se presenten de manera esporádica. Un estudio realizado en 2015 en las principales provincias productoras de maíz duro (Los Ríos, Manabí y Guayas), demostró la presencia de *Sugarcane mosaic virus* (SCMV) y *Maize chlorotic mottle virus* (MCMV), agentes causales de la necrosis letal del maíz, en un número significativo de plantas, detectándose infecciones asociadas con síntomas graves y pérdidas de cultivos [21]. Estudios para evaluar la resistencia genética a uno de los virus causantes de la enfermedad (SCMV) han sido realizados por el INIAP. Un grupo de 32 híbridos de maíz fueron inoculados y evaluados bajo invernadero con el fin de identificar resistencia genética al patógeno. Ninguno de los híbridos evaluados fue resistente al virus, pero se identificó a PIONEER 4226 y TROPI 101 como tolerantes [22].



Maize rayado fino virus (MRFV) es el agente causal de la enfermedad que afecta al cultivo de maíz en la Sierra del Ecuador. De igual manera, su presencia es esporádica, pero cuando se presenta puede reducir significativamente la producción. Varios materiales han sido reportados como resistentes a MRFV, entre ellos INIAP-180 [23], y se han reportado QTLs que confieren resistencia a esta enfermedad [24]. El uso de semilla certificada, el control del vector y la rotación del cultivo son las principales recomendaciones para prevenir las enfermedades virales [19].

Entomología

Al igual que con las enfermedades, existen varios reportes que describen a los principales insectos plagas de maíz en el Ecuador [25, 26]. El gusano cogollero (*Spodoptera* spp) es la principal plaga que afecta al cultivo de maíz en todas las regiones del país. El control químico es la alternativa de control más común [27]; sin embargo, se ha estudiado también la aplicación de productos orgánicos (*Bacillus thuringiensis*) [28]. Recientemente, se realizó una caracterización genética de *Spodoptera* colectados en el país, con el fin de identificar relaciones genéticas y migratorias con poblaciones de otros países, que permitan establecer mejores métodos de control [29].

Otra plaga importante es el barrenador del tallo (*Diatraea* spp), que en muchos casos pasa desapercibida, debido a que su daño no es tan evidente al producirse dentro del tallo. Varios híbridos de maíz han sido evaluados con el fin de identificar resistencia genética a esta plaga, pero todos han sido susceptibles; mientras que las infestaciones son mayores en el cultivo durante la época lluviosa que durante la época seca [30].

La biología de la "chicharrita" *Dalbulus maidis*, su dinámica poblacional y métodos de control han sido bastante estudiadas en el Ecuador, debido al rol que cumple este insecto en la transmisión de enfermedades virales y del fitoplasma que produce la enfermedad conocida como cinta roja [31-33]. El uso de insecticidas sistémicos en la semilla, el monitoreo y control del insecto a inicios del cultivo son la clave para controlar esta plaga [31].

Las principales plagas que afectan el cultivo de maíz en la Sierra del Ecuador son el gusano del choclo (*Heliothis zea*) y la mosca del choclo (*Euxesta eluta*), ambos se pueden controlar con aceite vegetal aplicados a los estigmas de la planta o el uso de cebos que contienen insecticida con melaza [19].

Uso de biotecnología (cultivo de tejidos, biología molecular, organismos genéticamente modificados)

En Ecuador se han realizado pocos estudios relacionados con el uso de la biología molecular y cultivo de tejidos aplicados al fitomejoramiento de maíz. El cultivo *in vitro* de anteras es una de las técnicas más utilizadas en cereales para generar líneas homocigotas o puras. En INIAP se inició una investigación piloto para evaluar la respuesta androgénica en cuatro cultivares de maíz: INIAP-101, INIAP-H601, AG-003 y Dekalb 5005. La respuesta androgénica fue nula o muy baja, lo que no permitió continuar con esta línea de investigación [34].



El uso de biología molecular en maíz se ha utilizado principalmente para realizar caracterizaciones moleculares de variedades de maíz, con el fin de estudiar la diversidad genética de las poblaciones nativas y mejoradas [35, 36]. En el INIAP se dispone de un banco de germoplasma con accesiones de maíz caracterizadas molecularmente con marcadores tipo RAPD y SSR [37].

En el Ecuador no están permitidos los cultivos transgénicos [38]; sin embargo, la importación de maíz y componentes alimenticios con fuentes de maíz de países que usan organismos genéticamente modificados (OGM), supone la presencia de productos transgénicos en Ecuador, por lo que es necesario etiquetar a los alimentos si el producto contiene más del 0.9% de componente transgénico. Algunos científicos han monitoreado cultivos y semillas de maíz de varias provincias de Ecuador para detectar la presencia de proteínas transgénicas y todas las muestras han resultado negativas [39,40], indicando que los cultivos de maíz transgénicos no estarían presentes en Ecuador; sin embargo, Santos y colaboradores comprobaron la presencia de proteínas de OGM en varios productos alimenticios elaborados con maíz [41]. Esta situación podría cambiar, sobre todo en la Amazonía, con la introducción de semilla ilegal por la frontera norte, debido a que en Colombia se comercializa semilla de maíz transgénico.

Densidades de siembra

La densidad de siembra en el cultivo de maíz es una de las decisiones más complejas que tiene que tomar el agricultor, ya que implica calcular la cantidad de semilla a comprar. Por esta razón, se hace necesario determinar la cantidad óptima de plantas que permitan su adecuado desarrollo y garanticen un alto rendimiento.

Varios investigadores han realizado estudios sobre los efectos de la fertilización y las densidades de siembra en los dos principales tipos de maíz que se producen en el Ecuador. En la provincia de Tungurahua se evaluó el efecto de la fertilización y densidades de siembra en el maíz blanco harinoso "chazo", reportando que la fertilización con 125 kg de N, 30 kg P₂O₅ y 100 kg K tuvo la mayor respuesta en el rendimiento con 2,26 t ha⁻¹; y no hubo respuesta al factor densidades de siembra [42]. Así mismo, al evaluar el comportamiento de la variedad de maíz "INIAP 122" bajo dos densidades de siembra (35.700 y 79.300 plantas ha⁻¹) y cuatro niveles de nitrógeno (N) en siembra directa, reportaron las mejores respuestas con aplicaciones de 160 kg de N (4,33 t ha⁻¹ de rendimiento en grano), mientras que no se encontraron diferencias para las densidades de siembra evaluadas [43]. Por otra parte, un estudio realizado en Chaltura (provincia de Imbabura) evaluó cuatro híbridos de maíz dulce bajo dos distancias de siembra, reportando que el híbrido "Bonanza" obtuvo el mayor rendimiento de grano con 4,18 t ha⁻¹, con una distancia de siembra de 0,20 m entre plantas y 0,80 m entre surcos [44].

Varias investigaciones con maíz duro en la Costa se han orientado a determinar las densidades de siembra y los niveles de fertilización adecuados para incrementar el rendimiento del maíz. Por ejemplo, Cuenca determinó el efecto de la alta densidad de siembra en el comportamiento de cuatro híbridos de maíz; sus resultados determinaron que la mejor densidad fue la de 1,50 x 0,15 m con el híbrido "Das 3383" que rindió 14,78 t ha⁻¹[45]. En otro estudio, se determinó el efecto de la humedad del suelo con cuatro densidades de planta y dos híbridos de maíz duro en la época seca; la mejor respuesta para



rendimiento de grano se obtuvo con el híbrido "Tropi-101", con 3,93 t ha⁻¹ con la densidad de 83.333 plantas ha⁻¹ [46]. En un estudio realizados por Chila y colaboradores para cuantificar la eficiencia de N en la producción de maíz sembrado en laderas, se determinó que la productividad del cultivo disminuyó al incrementarse la pendiente. Los tratamientos con pendiente cero rindieron 24% más que la media de la de los terrenos inclinados [47].

Otra línea de investigación importante ha sido la cuantificación de la producción de forraje en híbridos de maíz duro. Borbor evaluó cuatro híbridos de maíz duro y reportó que las mejores respuestas en materia verde se obtuvieron con el híbrido "DK 7508" con 47,35 t ha⁻¹ y un contenido de proteína cruda de 8,73% [48]. En otro estudio se evaluó la interacción época y densidad de siembra en ocho híbridos de maíz para la producción de forraje, y se reportó un rendimiento en materia verde y seca de 58,6 t ha⁻¹ y 21,4 t ha⁻¹, respectivamente y contenidos de proteína cruda de 10,6% [49].

Riego

Una de las principales causas del bajo rendimiento en el cultivo de maíz en el Ecuador se debe a la falta de agua. La mayor cantidad de superficie cultivada se realiza durante la época lluviosa (a temporal), que no siempre provee de la humedad necesaria para un óptimo desarrollo de las plantas. Se estima que apenas el 10% de la superficie sembrada de maíz en el Ecuador tiene acceso a riego [50]. Quienes disponen de agua para riego, por lo general, hacen un manejo inadecuado de la cantidad y frecuencias de las láminas de agua [19].

En el Centro Experimental del Riego, ubicado en Tunshi (suelo franco arenoso), Riobamba, se evaluaron los tres métodos de riego más comunes: gravedad, aspersión y goteo. Los resultados determinaron que la lámina total de agua (L m⁻²) necesaria para todo el ciclo de cultivo de maíz en Tunshi (ciclo del cultivo de nueve meses) fueron: 1.015 L m⁻² para gravedad, con una eficiencia de aplicación de 46%; 533 L m⁻² para aspersión, con una eficiencia de 84%; y 327 L m⁻² para goteo, con una eficiencia de 93% [51]; demostrando que el riego por goteo es el más eficiente para producir maíz y produce un mayor ahorro de agua y una menor huella ecológica. En el valle del río Portoviejo, León-Aguilar y colaboradores reportaron rendimientos con riego por goteo de hasta 18 t ha⁻¹ de grano, utilizando densidades de 133 mil plantas ha⁻¹ [52].

El uso de modelos y programas de computación para programar el riego por goteo es comúnmente utilizado para estimar valores de evapotranspiración, requerimientos hídricos, láminas de riego, tiempo de aplicación, entre otros. Utilizando CROPWAT, se estimó que el requerimiento hídrico para un híbrido de maíz cultivado en el valle del río Portoviejo (suelo franco arcilloso, ciclo de cuatro meses) es de 367,8 mm, garantizando una zona de humedad adecuada para el desarrollo del sistema radical de las plantas [53]. AQUACROP está siendo utilizado para estimar la eficiencia en el uso de agua y la fertilización en variedades de maíz en la Sierra del Ecuador [54].

Con el objetivo de aumentar aún más la eficiencia de uso de agua en el riego por goteo, en la Universidad Técnica de Machala, provincia de El Oro, se evaluó el efecto de la profundidad del gotero sobre la eficiencia en el uso del agua y el rendimiento de un híbrido de maíz, determinando que a 20 y 30 cm de profundidad se presentó el menor



volumen total de agua aplicado, el menor tiempo total de riego, la menor frecuencia de riego, el mayor diámetro y superficie de bulbo húmedo, el mayor rendimiento y eficiencia en el uso del agua [55].

La combinación del riego por goteo y fertilizantes da lugar a la fertirrigación. La fertirrigación es el proceso de aplicar los fertilizantes disueltos en agua directamente a la zona radicular de las plantas, con un ahorro de fertilizantes y mayores rendimientos. El riego por goteo continuo y automatizado, con el 50% de la dosis de fertilizantes recomendada, permitió incrementar en 116% el rendimiento de una variedad de maíz suave (harinoso) de libre polinización [56]. Esto demuestra que es posible alcanzar incrementos de rendimiento y reducir la cantidad de fertilizante que requiere el cultivo de maíz si se utilizan las tecnologías apropiadas.

Otros investigadores estudiaron parámetros hídricos y la calidad del maíz bajo un sistema de riego por goteo en el valle de Jauja- Jipijapa, provincia de Manabí [57]. En este estudio se utilizó el híbrido "INIAP H-601" para determinar: la frecuencia de riego, tiempo de riego, lámina de riego y dosis de N. Los mejores resultados (rendimiento de grano de 7,05 t ha⁻¹) se alcanzaron con una lámina de riego de 15 mm, 150 kg ha⁻¹ de N y una frecuencia diaria de una hora. En otro estudio realizado en Malacatos, provincia de Loja, se determinó que el requerimiento total de agua en el ciclo del cultivo de maíz morado fue 363 mm, con una necesidad hídrica de 526,24 litros de agua para obtener un kilogramo de maíz morado y un rendimiento estimado de 6,77 t ha⁻¹ [58].

Por otra parte, Vásconez y colaboradores evaluaron las necesidades hídricas en tres híbridos de maíz duro bajo el efecto de tres distanciamientos entre hileras, determinando que la evapotranspiración de los híbridos de maíz "INIAP H-551", "NB-7443" y "DAS-668" fue similar entre ellos e independiente al distanciamiento entre hilera, aunque se notó un mayor valor a medida que el distanciamiento se incrementó (80, 90 y 100 cm). El híbrido "DAS 668" tuvo la mayor respuesta en rendimiento con 10,72 t ha⁻¹ con una necesidad hídrica total de 336,1 mm [59].

MEJORAMIENTO GENÉTICO DE VARIEDADES E HÍBRIDOS PARA LAS REGIONES SIERRA Y LITORAL

Mejoramiento genético de variedades de libre polinización en la Sierra ecuatoriana

El mejoramiento genético de variedades de maíz de libre polinización para la Sierra inició en el país en el año de 1962 en la Estación Experimental Santa Catalina del INIAP. Desde su inicio, el mejoramiento estuvo enfocado en aumentar el rendimiento y la uniformidad de los maíces, utilizando germoplasma local e introducido. De esta manera, las primeras variedades de maíz se reportaron a partir de 1972, con el desarrollo de las variedades Santa Catalina, Amaguaña y Chillos, proceso que tomó alrededor de 10 años hasta liberar la variedad (Tabla 1).

Posteriormente, el CIMMYT estableció en el INIAP un programa de mejoramiento genético de maíz para la zona Andina, donde se generaron poblaciones de amplia base



genética (“Pooles Andinos”) agrupados según sus características de color y tipo de grano [60]. Estas poblaciones fueron desarrolladas con germoplasma procedente de la región andina y variedades mejoradas en otros países de Latinoamérica. De esta manera, se generaron las variedades INIAP-180 [61] e INIAP-101 [62], variedades que siguen vigentes debido a su gran base genética que le han permitido adaptarse a varios ambientes de la Sierra, y a la precocidad de INIAP-101, que lo diferencia de otras variedades locales [63].

En la década de los noventa se priorizó el mejoramiento de los maíces criollos, considerando la preferencia de los agricultores por sus variedades locales, debido a la textura, tamaño y color del grano, lográndose liberar cinco variedades de libre polinización: INIAP-122, INIAP-111, INIAP-124, INIAP-102 e INIAP-199; la mayoría de ellas se siguen cultivando en la Sierra del país (Tabla 1). La principal limitante de estas variedades es su adaptación específica a ciertos ambientes, lo que reduce el área de adopción e impacto.

Otra limitante en el uso de las variedades de libre polinización es la falta de semilla certificada, ya que el agricultor prefiere reutilizar su propio grano producido o utilizar grano comercial como semilla, haciendo inútiles los esfuerzos de entidades públicas y privadas por comercializar semilla. La poca adopción de semilla certificada de maíz en la Sierra es una de las causas del bajo rendimiento observado en la región. Iniciativas para desarrollar líneas endogámicas y generar híbridos de maíz harinoso no han sido satisfactorios debido a la alta susceptibilidad a la endogamia de este tipo de maíz (depresión endogámica) [64, 65].

El uso de la biotecnología en los procesos de mejoramiento genético en la Sierra ha sido muy escaso. Los métodos de mejoramiento genético utilizados por el Programa de Maíz han sido convencionales, por lo que es necesario innovar. Por ejemplo, el uso de dobles haploides para formar líneas endogámicas abre un campo de acción muy factible de aplicar en los maíces criollos de mayor demanda en la Sierra, ya que permitiría generar híbridos de alto rendimiento y crear el escenario propicio para el desarrollo de la industria de semilla de maíz en la región.

TABLA 1. Variedades de maíz de libre polinización generadas por el Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP) para la Sierra del Ecuador.

Año Liberación	Nombre	Color y tipo de grano	Rendimiento de grano (t ha ⁻¹)	Rango de adaptación (m s.n.m.) / Provincia	Referencia
<1972	“Santa Catalina” ^x	Amarillo, harinoso	3,6	2600-3000/ Pichincha	[66]
<1972	“Amaguaña” ^x	Blanco, cristalino	3,2	2400-2800/ Pichincha	[67]
<1972	“Chillos Mejorado” ^y	Amarillo, harinoso	3,6	2400-2700/Pichincha	[68]
< 972	INIAP-176 ^x	Amarillo, cristalino	4,1	2200-2600/Todas Sierra	[69]
<1981	INIAP-126 ^y	Amarillo, harinoso	4,3	2200-2800/ Pichincha, Imbabura, Carchi	[70]



Año Liberación	Nombre	Color y tipo de grano	Rendimiento de grano (t ha ⁻¹)	Rango de adaptación (m s.n.m.) / Provincia	Referencia
< 1981	INIAP-153 "Zhima" ^y	Blanco, harinoso	4,0	2200-2600/Cañar, Azuay	[70]
1980	INIAP-101 ^x	Blanco, harinoso	4,0	2200-2800/Todas	[71]
1986	INIAP-130 ^x	Amarillo, harinoso	3,0	2500-2800/Pichincha, Imbabura, Carchi	[72, 73]
1986	INIAP-180 ^x	Amarillo, cristalino	5,5	2250-3000/Todas Sierra	[74]
1989	INIAP-131 ^x	Amarillo, harinoso	4,5	2400-2900/Todas Sierra	[75]
1989	INIAP-198 "Canguil Mejorado" ^y	Amarillo, reventón	3,3	2400-2900/Imbabura, Pichincha, Cotopaxi	[76]
1990	INIAP-192 "Chulpi Mejorado" ^y	Amarillo, dulce	3,5	2400-2800/Todas Sierra	[77]
1995	INIAP-160 ^x	Blanco, semi-dentado	4,6	2500-3100/Imbabura, Pichincha, Chimborazo	[78]
1997	INIAP-111 "Guagal Mejorado" ^z	Blanco, harinoso	4,1	2400-2800/Bolívar	[79]
1998	INIAP-122 "Chaucho Mejorado" ^z	Amarillo, harinoso	4,5	2200-2800/Imbabura	[80]
2000	INIAP-102 "Blanco Blandito Mejorado" ^z	Blanco, harinoso	4,1	2200-2800/Chimborazo	[81]
2002	INIAP-124 "Mishca Mejorado" ^z	Amarillo, harinoso	3,9	2200-2900/Cotopaxi, Pichincha	[82]
2013	INIAP-103 "Mishqui Sara" ^x	Blanco, harinoso,	4,5	1700-2650/Azuay, Loja	[83]
2017	INIAP-199 "Racimo de Uva" ^z	Negro, harinoso	3,0	2400-3000/Chimborazo, Pichincha, Imbabura, Cotopaxi.	[84]

^xMejoramiento por cruzamiento con poblaciones mejoradas e introducciones; ^yMejoramiento por selección masal; ^zMejoramiento por medios hermanos. Fuente: Adaptado de Zambrano et al. [85].

Mejoramiento genético de híbridos de maíz en el Litoral o Costa

Los altos rendimientos generados por la heterosis en la generación de los maíces híbridos ha sido una de las más importantes innovaciones en el ámbito del mejoramiento genético de plantas. Las distintas combinaciones híbridas pueden ser adaptadas para diversos ambientes tropicales en los que se cultiva maíz.



En la región Litoral o Costa se comercializan varios híbridos de maíz de grano amarillo duro introducidos por las transnacionales. En la Tabla 2 se presenta el rendimiento de varios de estos híbridos durante el invierno (época lluviosa) del 2020 [86]. Se observa que los mejores rendimientos promedio en las seis provincias se obtuvieron con los híbridos “Emblema 777”, “Dekalb 7088” y “Triunfo” con 4,57, 4,38, y 4,33 t ha⁻¹, respectivamente.

TABLA 2. Rendimientos de híbridos de maíz amarillo duro comercializados por las empresas privadas en seis provincias de la Costa del Ecuador. Época lluviosa, 2020.

Provincia	Híbrido	Rendimiento (t ha ⁻¹)
El Oro	Dekalb 7088	4,55
	Triunfo	5,21
	Trueno	4,08
Guayas	Emblema 777	4,44
	Advanta 9313	4,01
	Dekalb 7088	3,80
Loja	Dekalb 7088	4,80
	Triunfo	4,93
Los Ríos	Emblema 777	4,78
	Advanta 9313	4,64
	Somma	3,95
Manabí	Emblema 777	4,50
	Advanta 9313	3,75
	Triunfo	2,86
	Trueno	3,86
Santa Elena	Advanta 9313	3,99
	Trueno	3,64
	Das3383	2,99
Promedio		4,29

Fuente: Ministerio de Agricultura y Ganadería [86].

La Tabla 3 muestra los híbridos desarrollados por el INIAP en el periodo 1990-2021. La mayoría de estos híbridos son simples, liberados al comercio entre los años 2004 y 2021, y los híbridos triples en el periodo 1990-2003. La mayoría de los híbridos tienen uno o dos progenitores provenientes del Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT), lo que demuestra la importancia e impacto de esta institución en el país.



TABLA 3. Híbridos de maíz de grano duro generados por el Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP) para la región Litoral o Costa de Ecuador.

Año de liberación	Nombre	Origen	Rendimiento [^] (t ha ⁻¹)	Rango de adaptación (m s.n.m.) / Provincia	Referencia
1985	INIAP H-550 ¹	INIAP 515 x (S. Andrés 7528 Fam 5 x Fam 23) (CIMMYT)	4,94	60-500/Los Ríos y Guayas	[87]
1990	INIAP H-551 ¹	(S4 B523 x S4 B521) x S4 B520	5,07	60-500/Los Ríos y Guayas	[88]
2003	INIAP H-552 ¹	(S4 Fam 5 x S4 B530) x S4 B520	5,92	60-500/Los Ríos y Guayas	[89]
2004	INIAP H-601 ²	S4 LP3a x CML-287 (CIMMYT)	5,47	44-300/Manabí	[90]
2009	INIAP H-602 ²	S4 Pob.4 x CML-287 (CIMMYT)	8,44	44-300/Manabí, Los Ríos y Guayas	[91]
2010	INIAP H-553 ²	L49 Pichilingue 7928 x L237 Pob. A1	7,61	60-500/Los Ríos y Guayas	[92]
2012	INIAP H-824 ²	NPH28-1-G25*NPH2 x Pob24 STEC IHC16 (CIMMYT)	8,30	300-760/Loja	[93]
2016	INIAP H-248 ^{2*}	PM03B-23-19 x PM03B-023-20 (CIMMYT)	8,03	40-1500/Loja, Santa Elena, Guayas y Los Ríos	[94]
2016	INIAP H-603 ²	Pob.3 F4 x CML 451 (CIMMYT)	7,64	44-300/Manabí y Los Ríos	[95]
2021	INIAP H-554 ²	L-21-3-1-1-COM-2 x CML-172 (CIMMYT)	8,10	18-760/Los Ríos, Guayas, Manabí, Santa Elena y Loja	[96]

[^]Época lluviosa (a temporal); 1Híbrido triple; 2Híbrido simple; *Grano color blanco semidentado.

Incremento de la productividad del maíz en el Litoral o Costa

Según la FAO [1], la productividad promedio del maíz en Ecuador hasta 2010 era inferior a las 2,5 t ha⁻¹ (Fig. 1). Posteriormente, se aprecia una tendencia creciente (exponencial) [97], que logró duplicar ese valor en pocos años, motivado por el uso de las tecnologías antes indicadas y de los programas de subvención de paquetes tecnológicos del gobierno [98].

Recientemente, Zambrano y Andrade realizaron proyecciones, bajo diversos escenarios, del rendimiento de grano de maíz amarillo duro en el país para los próximos cinco años. Un escenario pesimista indicó que se esperaba un rendimiento promedio de 5,29 t ha⁻¹; pero en un escenario optimista se alcanzaría un promedio de 7,01 t ha⁻¹ [99].

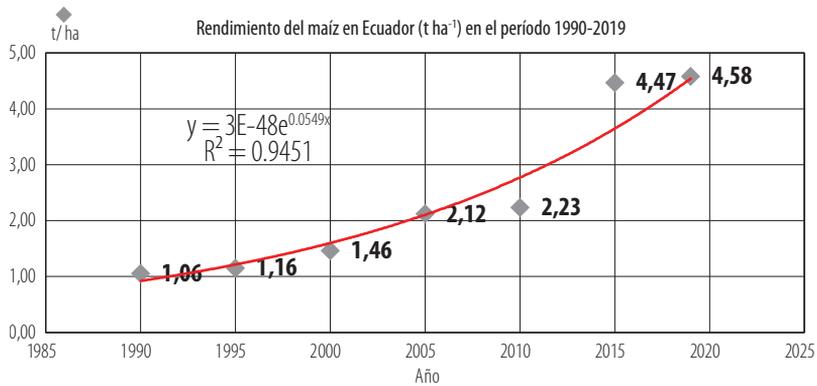


FIGURA 1. Evolución del rendimiento promedio de maíz en Ecuador en el período 1990-2019.
Fuente: FAOSTAT [37].

Evaluación de la rentabilidad de los híbridos de maíz amarillo duro en el Litoral o Costa

Existen numerosos estudios que evaluaron el rendimiento de los híbridos de maíz en varias localidades del país (Tabla 4). Molina encontró en su estudio que el híbrido que generó el mayor rendimiento y la más alta rentabilidad fue Dekalb DK-7088 con 7,69 t ha⁻¹ [100]. En otro estudio, se reportó que el híbrido Pioneer F30K73 logró un rendimiento de 7,15 t ha⁻¹, muy superior a los híbridos INIAP H551 (5,25 t ha⁻¹), Trueno NB7443 (4,65 t ha⁻¹) y Gladiador DOW-2B688 (4,5 t ha⁻¹) [101]. Por otro lado, el mismo Pioneer F30K73 en Balzar, provincia del Guayas, solo alcanzó un rendimiento de 6,11 t ha⁻¹ [102]; es decir, que el híbrido que alcanza altos rendimientos en un lugar puede tener bajos rendimientos en otro y viceversa, mostrando una respuesta a la interacción genotipo-ambiente y manejo agronómico.

En otro estudio [103], realizado en el cantón Mocache, provincia de los Ríos, Pioneer P4039 obtuvo el mejor rendimiento (8,14 t ha⁻¹) entre cuatro híbridos evaluados; y, por su parte, [104] encontró que, en la misma provincia, pero esta vez en San Carlos, el mejor rendimiento lo obtuvo el híbrido Dekalb 5005 con 10,72 t ha⁻¹. De igual manera, [105] estudió el desempeño de cuatro híbridos en el cantón Pueblo Viejo, Provincia de Los Ríos y encontró esta vez que Pioneer 30F35 logró un rendimiento de 9,42 t ha⁻¹, superando a sus contrapartes que obtuvieron rendimientos menores (entre 5,74 y 7,82 t ha⁻¹) (Tabla 4).

Debido a este fenómeno, sería necesario evaluar el rendimiento de todos los híbridos en las principales zonas productoras (*local-community performance trials*), lo que permitiría a los agricultores conocer cuáles son aquellos híbridos que se comportan mejor en su localidad. Este estudio podría realizarse por fases. Por ejemplo, en la fase I se evaluarían híbridos en varias localidades por separado y se visualizarían los de mejor rendimiento. En la Fase II, se probarían los mejores en cada localidad para, o verificar al mejor de la fase I, o encontrar un nuevo híbrido con mayor productividad; y en la fase III, se realizaría un estudio con diversos manejos agronómicos y el mejor o mejores híbridos de la fase II. Esto permitiría incrementar aún más el rendimiento de cada localidad con un mayor beneficio para los agricultores.



TABLA 4. Relación entre genotipo, localidad, condiciones climáticas y agronómicas con el rendimiento del cultivo de maíz e indicadores económicos.

Genotipo (Híbrido)	Rendimiento (t ha ⁻¹)	Provincia/ Localidad	Altitud/ciclo de cultivo/ clima/densidad de siembra	Indicadores económicos (USD)	Referencia
Pioneer F30K73	7,15	Sto. Domingo de los Tsáchilas/ Luz de América	224 m s.n.m./ Noviembre-Febrero/ Pr: 2700mm, HR: 80-90%, T: 24,5 °C / 62.000 plantas ha ⁻¹	n.d.	[101]
INIAP H-551	5,25				
Trueno (NB7443)	4,65				
Gladiador (DOW-2B688)	4,50				
				Beneficio/costo	
INIAP H-601	5,48	Loja/ Pindal	780 m s.n.m./ Enero-Mayo/ Pr: 1035mm, HR:80%, T: 23,1 °C / 50.000 plantas ha ⁻¹	1,67	[100]
INIAP H-553	5,17			1,59	
AGRI-104.	4,89			1,37	
Dekalb 7088	7,69			1,95	
Advanta 9139	7,52	Los Ríos/ Mocache	74 m s.n.m./ Enero-Mayo/ Pr: 2252mm, HR: 84%, T 24,8 °C/ 62.500 plantas ha ⁻¹	n.d.	[103]
Pioneer P4039	8,14				
Emblema 777	7,47				
Advanta 9735	7,20				
				Beneficio ha ⁻¹	
INIAP H-552	4,85	Los Ríos/ San Carlos	81 m s.n.m./ Enero-Mayo/ Pr: 2100mm, HR: 85%, T: 24,5 °C/ 78.125 plantas ha ⁻¹	277,20	[104]
Vencedor (H8330)	8,19			705,90	
Dekalb 5005	10,72			989,20	
				Beneficio/costo	
INIAP H-551	5,74	Los Ríos/ Pueblo Viejo	100 m s.n.m./ Enero-Mayo/ HR: 44%, T: 27 °C/ 62.500 plantas ha ⁻¹	1,41	[105]
Pionner 30F35	9,42			1,94	
Agri 201	7,82			1,70	
Trueno (NB7443)	6,63			1,55	

n.d.: no disponible; Pr: precipitación anual, HR: humedad relativa, T: temperatura promedio.

Existe una relación directamente proporcional entre el rendimiento agronómico y la rentabilidad financiera (Tabla 4). Sin embargo, en el caso del estudio de Molina [100] se encontró un mejor ajuste con una relación del tipo logarítmico (rentabilidad = 1.1939 en (rendimiento (t ha⁻¹)) -0.3856, r²= 0.83) y en el caso del estudio de Sandal-Paucar [105], con una relación lineal (rentabilidad = 0.1423 en (rendimiento (t ha⁻¹)) +0.60, r²= 0.999). En ambos casos, el punto de equilibrio (rendimiento = 1) se alcanzaría con un rendimiento de 3,0 t ha⁻¹. Es decir, que cultivos de maíz con rendimientos de 3,0 t ha⁻¹ o menos no serían rentables.



CONCLUSIONES

En el Ecuador se han desarrollado tecnologías que han permitido un incremento sostenido de la producción de maíz en los últimos años. Este incremento es más evidente en la Costa o Litoral del país, donde el desarrollo tecnológico es acelerado por el impulso de las transnacionales y empresas privadas. En la Sierra, en cambio, el desarrollo es más lento y existen brechas productivas enormes en temas de mejoramiento genético y agronómico que deben ser considerados en los procesos de I+D+i. El caso más evidente es la falta de semilla híbrida de alto rendimiento que permita aumentar la producción de los maíces amiláceos.

La investigación generada por el INIAP y las universidades, con el apoyo del CIMMYT, ha sido fundamental para el desarrollo del cultivo en el Ecuador. Los híbridos generados por el INIAP y los introducidos por las empresas privadas han permitido incrementos importantes en la producción y productividad del maíz, lo que ha reducido drásticamente las importaciones de grano, logrando estar muy cerca de la autosuficiencia de este importante cereal.

Además de la genética, el rendimiento de un híbrido de maíz depende de la adaptabilidad de la planta, que puede ser muy específico para una determinada zona, y del manejo agronómico que se le brinde a la semilla. Algunos factores que podrían considerarse para elevar el rendimiento del cultivo de maíz en el Ecuador son: i) la aplicación de la Ley Orgánica de Agro biodiversidad, Semillas y Fomento de la Agricultura Sustentable (Registro Oficial 10 Año 2017), (ii) aumentar el uso de semillas certificadas, (iii) asociatividad de los productores, (iv) invertir al menos el 1% del Producto Interno Bruto Agropecuario (PIBA) en investigación para la agricultura, y (v) mejorar la transferencia y difusión de tecnologías.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad San Francisco de Quito por la gestión para la elaboración y publicación de este artículo. De igual manera, a la Red Latinoamericana del Maíz y al Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED).

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Mario Caviedes contribuyó con la idea, realizó la tabulación de información, críticamente analizó los datos y escribió el artículo. Francisco Carvajal contribuyó con la idea, realizó la tabulación de información, críticamente analizó los datos y escribió el artículo. José Luis Zambrano contribuyó con la idea, realizó la tabulación de información, críticamente analizó los datos y escribió el artículo.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no existe conflicto de interés.

REFERENCIAS

- [1] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura FAO. (2021) Datos estadísticos FAOSTAT. Recuperado el 9 de diciembre de 2021 de: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>
- [2] Sistema de Información Pública Agropecuaria SIPA. (2021). Cifras Agroproductivas. Ministerio de Agricultura y Ganadería, Quito, Ecuador. Datos disponible del año 2019. Recuperado el 5 de Junio de 2021 de: <http://sipa.agricultura.gob.ec/index.php/cifras-agroproductivas>
- [3] Zambrano, J. L., Yáñez, C., Sangoquiza, C., López, V., Asaquibay, C., Nieto, M., Villacrés, E., Quelal, M., Velásquez, J., Chalampunte, D., Lima, J. (2021). Mejoramiento genético de maíz (*Zea mays* L.) Chulpi y Canguil en la Sierra del Ecuador. *Archivos Académicos* 38, 49-50.
- [4] Cartagena, Y., Parra, R., Alvarado, S., Valverde, F., Zambrano, J.L. (2020). Eficiencia del uso de abonos verdes y urea en el cultivo de maíz. *ACI Avances en Ciencias E Ingenierías* 12(22), 80-93.
- [5] Zambrano, J.L., Cartagena, Y., Carrillo, M., Sangoquiza, C., Durango, W., Parra, R., Campaña, D. (2021). Deficiencias nutricionales en maíz. INIAP, KOPIA, Boletín informativo.
- [6] Sancho, H. (1999). Curvas de absorción de nutrientes: importancia y uso en los programas de fertilización. *Informaciones Agronómicas*, 36, 11-13.
- [7] Carrillo, M. D., Durango Cabanilla, W. D., Morales Intriago, F. L., Rivadeneira Moreira, B. J., & Cargua Chavez, J. E. (2019). Variación en la absorción de macronutrientes en híbridos de maíz duro. *ACI Avances En Ciencias E Ingenierías*, 11(1), 20-31. <https://doi.org/10.18272/aci.v11i1.1077>
- [8] Motato, N.E., Pincay, J.D., Avellán, M., Falcones, M.K., y Aveiga, E.Ch. (2016). Fertilización del híbrido experimental de maíz INIAP H-603, con base en la eficiencia agronómica del nitrógeno. *ESPAMCIENCIA*, 7(2), 109-116.
- [9] Witt, C., Pasuquin, J.M., Dobermann, A. (2006). Towards a Site-Specific Nutrient Management Approach for Maize in Asia. *Better Crops*, 90(2), 28-31.
- [10] Alvarado Ochoa, S. P., Jaramillo, R., Valverde, F., y Parra, R. (2011). Manejo de nutrientes por sitio específico en el cultivo de maíz bajo labranza de conservación para la provincia de Bolívar. INIAP, Boletín Técnico No. 150. Quito, Ecuador.
- [11] Hasang, E. S., Carrillo, M. D., Durango, W. D., & Morales, F. L. (2018). Omisión de nutrientes: eficiencias de absorción, rendimiento y calidad de semilla en la formación de un híbrido de maíz. *Journal of Science and Research*, 3(11), 33-45. doi: <https://doi.org/10.26910/issn.2528-8083vol3iss11.2018pp33-45p>
- [12] Cedeño, G., Avellán, B., Velásquez, S., Limongi, R. (2021). Fertilización líquida localizada como estrategia de nutrición en maíz de secano. *Archivos Académicos* 38, 44-45
- [13] Sangoquiza, C.A., Yáñez, C.F., Borges, M. (2019). Respuesta de la absorción de nitrógeno y fósforo de una variedad de maíz al inocular *Azospirillum* sp y *Pseudomonas fluorescens*. *ACI Avances En Ciencias E Ingenierías*, 11(17), 8-19.
- [14] Zambrano-Mendoza, J.L., Sangoquiza-Caiza, C.A., Campaña-Cruz, D. F., and Carlos F. Yáñez-Guzmán (2021). Use of Biofertilizers in Agricultural Production. In: *Technology in Agriculture*, IntechOpen, Chap. 10, 193-210. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.98264>
- [15] Vásquez, A. (2021). Respuesta a la aplicación de dos bioabonos en el cultivo de maíz (*Zea mays* L.), el Morro-Guayas (Tesis de Ingeniería). Universidad Agraria del Ecuador, Guayaquil, Ecuador.
- [16] Aldás-Jarrín, J. C., Zurita-Vásquez, J. H., Cruz-Tobar, S. E., Villacís-Aldaz, L. A., Pomboza-Tamaquiza, P. P., León-Gordón, O. A. (2016). Efecto biofertilizante de azolla - anaebaena en el cultivo de maíz (*Zea mays* L.). *J Selva Andina Biosph.*, 4(2):109-115.
- [17] Villavicencio, J. P. y Zambrano, J. L. (2014). Guía para la producción de maíz amarillo duro, en la zona central del Litoral Ecuatoriano. Quevedo, Ecuador: INIAP, Estación Experimental Tropical Pichilingue, Programa de Maíz. (Boletín Divulgativo no. 353).
- [18] Suárez, C., Arguello, V., Delgado, A., Pico, J. (2021). Reconocimiento de las principales afectaciones fitopatológicas del cultivo de maíz en la provincia de Orellana. *Archivos Académicos* (38), 26.

- [19] Zambrano, J.L., Velásquez, J., Peñaherrera, D., Sangoquiza, C., Cartagena, Y., Villacres, E., Garcés, S., Ortíz, R., León, J., Campaña, D., López, V., Asaquibay, C., Nieto, M., Sanmartín G., Pintado, P., Yáñez, C., Racines, M. (2021). Guía para la producción sustentable de maíz en la Sierra ecuatoriana. INIAP, Manual No. 122. Quito, Ecuador.
- [20] Estrada-Martínez, M. E. (2021). Principales enfermedades del maíz (*Zea mays*, L.) en Ecuador. *Revista Científica Agroecosistemas*, 9(2), 53-59.
- [21] Quito-Avila, D.F., Alvarez, R.A. and Mendoza, A. 2016. Occurrence of maize lethal necrosis in Ecuador: a disease without boundaries? *Eur. J. Plant Pathology*, 146: 705-710.
- [22] Zambrano, J. L., Paz, L. C., & Redinbaugh, M. G. (2019). Evaluación de la resistencia genética de híbridos de maíz al virus del mosaico de la caña de azúcar (SCMV). *ACI Avances En Ciencias E Ingenierías*, 11(1), 64-71. doi: <https://doi.org/10.18272/aci.v11i1.1092>
- [23] Zambrano, J.L., Francis, D.M., & Redinbaugh, M.G. (2013). Identification of resistance to *Maize rayado fino virus* in maize inbred lines. *Plant Disease*, 97 11, 1418-1423.
- [24] Zambrano, J.L., Jones, M.W., Francis, D.M., Tomas, A., & Redinbaugh, M.G. (2014). Quantitative trait loci for resistance to *Maize rayado fino virus*. *Molecular Breeding*, 34, 989-996.
- [25] Cañarte, E., Navarrete, J.B., Solórzano, R. (2016). Reconozca y controle a los principales insectos-plaga del maíz. Portoviejo, Ecuador: INIAP, Estación Experimental Portoviejo, Departamento de Entomología. Cartilla informativa, recuperado de: <https://repositorio.iniap.gob.ec/handle/41000/4908>
- [26] Zambrano, J., Sangoquiza, C., Yáñez, C., Navarrete, B., Cañarte, E., & Cho, J. (2020). Insectos plagas del cultivo de maíz. Recuperado el 4 de noviembre de 2021 de: <https://bit.ly/3cvlAaj>
- [27] España, P., Bustillos, M., Barona, D., López, E. (2021). Evaluación de tiametoxam + clorantropilprole para el control de gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda*) en el cultivo de maíz. *Archivos Académicos* (38), 32.
- [28] Drouet-Candell, A. (2018). Efecto de la aplicación de *Bacillus thuringiensis* en el control del gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda* J.E. Smith) del híbrido de maíz (*Zea mays*) INIAP H-551 en la comuna Río Verde provincia de Santa Elena. *Revista Científica Y Tecnológica UPSE*, 5(1), 47-56. doi: <https://doi.org/10.26423/rctu.v5i1.312>
- [29] Nagoshi, R.N., Nagoshi, B.Y., Cañarte, E., Navarrete, B., Solórzano, R., Garcés-Carrera, S. (2019) Genetic characterization of fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) in Ecuador and comparisons with regional populations identify likely migratory relationships. *Plos One* 14(9): e0222332. doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0222332>
- [30] Solórzano, R., Cañarte Bermúdez, E., y Navarrete Cedeño, J.B. (2017). Respuesta de varios híbridos de maíz a la incidencia del barrenador del tallo *Diatraea* spp (Lepidoptera: Pyralidae). Recuperado el 4 de noviembre de 2021 de: <https://bit.ly/3CDcfJg>
- [31] Valarezo, O., Cañarte, E., Navarrete, J.B., Intriago, M. (2009). La Chicharrita (*Dalbulus maidis*) y su manejo en el cultivo de maíz. Portoviejo, Ecuador: INIAP, Estación Experimental Portoviejo, (Plegable Divulgativo No. 305).
- [32] Valarezo, O., Intriago, M., Muñoz, X. (2013). Biología de la "chicharrita" *Dalbulus maidis* (Homoptera: Cicadellidae) y confirmación de su capacidad como vector del complejo viral de la Cinta Roja del maíz. *La Técnica*, (9), 36-39.
- [33] Burgos, T. (2020). Evaluación de la dinámica poblacional de *Spodoptera frugiperda*, *Diatraea saccharalis* y *Dalbulus maidis* en el cultivo de maíz (*Zea mays* L.) durante la época seca en cinco localidades del Cantón Mocache (Tesis de Ingeniería). Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Quevedo.
- [34] Aguilar-Cueva, M. C. (2007). Evaluación de la respuesta androgénica de cuatro genotipos de maíz mediante la técnica de cultivo in vitro de anteras (Tesis de Ingeniería). Escuela Politécnica del Ejército, Quito.
- [35] Garrido-Haro, A. D. (2010). Caracterización molecular de la colección núcleo de maíz de altura del INIAP mediante marcadores moleculares microsatélites (Tesis de Ingeniería). Escuela Politécnica del Ejército, Salgoquí.
- [36] Torres, M. de L., Bravo, A. L., Caviedes, M., & Arahana B., V. S. (2012). Caracterización molecular y morfológica de las líneas S2 de maíz negro (*Zea mays* L.) de los Andes ecuatorianos. *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías*, 4(1). doi: <https://doi.org/10.18272/aci.v4i1.81>
- [37] Yáñez, C., Zambrano, J. L., Caicedo, M., Sánchez Arizo, V. H., y Heredia, J. (2003). Catálogo de recursos genéticos de maíces de altura ecuatorianos. Quito, Ecuador: INIAP, Estación Experimental Santa Catalina, Programa de Maíz.



- [38] Orbe, K., Escobar, J., Sánchez, V., Zambrano, J. (2017). Memorias del Taller: Métodos y Desarrollo de Protocolos para la Investigación en Organismos Genéticamente Modificados. INIAP, Ecuador. Revisado el 5 de noviembre de 2021, disponible en: <https://bit.ly/3HEWeGq>
- [39] Nishikawa, M., Granda, K., Robles, A. (2015). Presencia o ausencia de maíz modificado genéticamente en las especies que se cultivan en Loja. *Centro de Biotecnología* 4(1), 6-13.
- [40] Bravo, E., and León, X. (2013). Participatory monitoring of corn from Ecuador for detection of the presence of genetically modified proteins. *Grana* 17 (1), 16–24.
- [41] Santos, E., Sánchez, E., Hidalgo, L., Chávez, T., Villao, L., Pacheco, R. and Navarrete, O. (2016). Status and challenges of genetically modified crops and food in Ecuador. *Acta Hortic.* 1110, 229-235.
- [42] Dobronski-Arcos, J., Barona, D., Bustillos, M., Grefa-Yumbo, M. (2021). Respuesta del maíz blanco harinoso tipo “Chazo” a las condiciones agroclimáticas de Cevallos, Tungurahua, Ecuador. *Archivos Académicos USFQ* (38), 36.
- [43] Montesdeoca, F., Palomeque, G. (2020). Evaluación del comportamiento de maíz (*Zea mays* L) variedad INIAP 122 bajo dos densidades poblacionales y cuatro niveles de Nitrógeno en siembra directa. Universidad Central del Ecuador. Facultad de Ciencias Agrícolas – Carrera de Ingeniería en Agronomía. Trabajo de titulación. Ingeniero Agrónomo. 90.
- [44] Loza, A. (2017). Evaluación de híbridos de maíz dulce (*Zea mays* L) variedad *Saccharata* bajo dos distancias de siembra para grano enlatado (Tesis de Ingeniería). Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador.
- [45] Cuenca, S. (2019). Efecto de la alta densidad de siembra en el comportamiento agronómico de cuatro híbridos de maíz (Tesis de Ingeniería). Universidad Agraria del Ecuador, Guayaquil, Ecuador.
- [46] Zamora, F. (2016). Estudio del efecto de la humedad remanente del suelo y densidad poblacional de híbridos de maíz (*Zea mays* L) sembrados en la época seca en la zona de Quevedo (Tesis de Ingeniería). Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Quevedo, Ecuador.
- [47] Chila, M., Amores, F., Gaibor, R. (2021). El relieve del terreno cambia la absorción y eficiencia del uso N afectando la productividad y rentabilidad del maíz (*Zea mays* L) de secano con cero labranza. *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías* 12(22), 53.
- [48] Borbor, A. (2018). Producción de materia verde de 4 híbridos de maíz (*Zea mays* L) (Tesis de Ingeniería). Universidad Fuerzas Armadas (ESPE), Sangolquí, Ecuador.
- [49] Cañadas, A., Molina, C., Rade, D., Fernández, F. (2016). Evaluación de la interacción época y densidad de siembra en ocho híbridos de maíz para la producción de forraje. *Revista MVZ Córdoba* 21: 512-513.
- [50] León, R., Torres, A., Ardisana, E., Fosado, O., Véliz, F., Pin, W. (2018). Comportamiento productivo del maíz híbrido Agri-104 en diferentes sistemas, densidades de siembra y riego localizado. *ESPAMCIENCIAS*, 10(1):124-130.
- [51] León-Ruiz, J. E., León-Terán, J.E., Silva-Orozco, J.S. (2021). El riego en maíz de altura (*Zea mays* L.) para la Sierra ecuatoriana. *Archivos Académicos* (38), 14.
- [52] León-Aguilar, R., Torres-García, A., Sánchez-Mora, F. (2021). Efecto de la densidad de siembra y riego localizado por goteo en el comportamiento productivo del maíz. *Archivos Académicos* (38), 46.
- [53] León, R., Torres, A., Ardisana, E., Rosado, O. (2018). Comportamiento productivo del maíz híbrido (AGRI 104), en diferentes sistemas, densidades de siembras y riego localizado. *Revista ESPAM- Ciencia. Volumen 8* (2). 123-129.
- [54] Cartagena, Y., Zambrano, J., Parra, R., Angamarca, M., Sangoquiza, C., Condor, A., León, J., Ortiz, R. (2020). Evaluación del uso eficiente del agua en el cultivo de maíz (*Zea mays*) variedad INIAP 101, utilizando los métodos isotópico y convencional. *Archivos AcadémicosUSFQ* (27), 55.
- [55] Conde-Solano, J. L., Sánchez-Urdaneta, A. B., Colmenares-de-Ortega, C. B., Vásquez, E., & Ortega-Alcalá, J. (2021). Impacto del riego por goteo subsuperficial en la eficiencia de uso del agua en maíz (*Zea mays* L.). *Revista Científica Agroecosistemas*, 9(1), 49-57.
- [56] Ortiz, R., Quilanchamin, A., Chile, M., Cartagena, Y. (2021). Efecto del fertiriego en el cultivo de maíz harinoso (*Zea mays* L. var. *amylacea*) variedad pepa. *Archivos Académicos* (38), 43.
- [57] Alvarez, M., Alvarez, H. (2018). Parámetros hídricos y calidad del maíz (*Zea mays* L) bajo riego por goteo en el valle Joa, Ecuador (Tesis Maestría). Universidad Agraria del Ecuador, Guayaquil, Ecuador.



- [58] Yanangonez L.V. (2018). Evaluación del rendimiento hídrico del maíz morado (*Zea mays* L) en la Parroquia Malacatos, Sector San José, Loja (Tesis de Ingeniería). Universidad Nacional de Loja, Loja, Ecuador.
- [59] Vásconez, G., Calvache, M., Díaz, G., Sabando, F. (2010). Determinación de las necesidades hídricas de tres híbridos de maíz (*Zea mays* L) bajo el efecto de tres distanciamientos entre hileras. Memorias XII Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo. Universidad Tecnológica Equinoccial- Postgrados. Santo Domingo 17 noviembre del 2010.
- [60] Caviedes, C. M. (1987). Factores ambientales que influyen en el mejoramiento del maíz en la Sierra ecuatoriana. En B. Ramakrishna (Ed.), III Seminario: Mejoramiento para Tolerancia a Factores Ambientales Adversos en el Cultivo del Maíz, Quito, Ecuador: IICA/BID/PROCIANDINO. pp. 233-235.
- [61] Caviedes C., M. (1986). "INIAP-180": Nueva variedad de maíz de alto rendimiento. Quito, Ecuador: INIAP, Estación Experimental Santa Catalina, Programa de Maíz. Boletín Divulgativo No. 180.
- [62] Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP). (1981). Cultive maíz blanco "INIAP-101". Quito, Ecuador: Plegable No. 28.
- [63] Cardoso, V.H., y Zambrano M., E.M. (1984). El maíz precoz INIAP-101, una alternativa en el sistema de producción de pequeños agricultores de la provincia de Imbabura. En XI Reunión de Maiceros de la Zona Andina, II Reunión Latinoamericana del Maíz, Palmira, Colombia: ICA/CIMMYT. pp. 209-219.
- [64] Vásquez C., W., Silva, E., Moreno A., F., y Caviedes C., M. (septiembre, 1988). Evaluación agronómica de líneas S2 y S3 derivadas de la variedad de maíz INIAP-130 en la Estación Experimental Santa Catalina INIAP-Ecuador [CD]. En XIII Reunión de Maiceros de la Zona Andina: Memorias (pp. 225-237). Chiclayo, Perú: INIAA/CIMMYT.
- [65] Zambrano, J.L., Yáñez G., C., y Mora C., E. (2003). Evaluación de líneas S1 de maíces amarillos y blancos harinosos resistentes a *F.moniliforme*, bajo inoculación artificial en Ecuador. En D.L. Danial, Informe anual de subproyectos 2002 Quito, Ecuador: PREDUZA. pp. 9-11.
- [66] Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP) (1972a). Variedad "Santa Catalina": Cuadruplica su producción. Quito, Ecuador: Estación Experimental Santa Catalina.
- [67] Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP), (1972b). Variedad "Amaguaña": Cuadruplica su producción. Quito, Ecuador: Estación Experimental Santa Catalina.
- [68] Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP), (1972c). Variedad "Chillos Mejorado": Cuadruplica su producción. Quito, Ecuador: Estación Experimental Santa Catalina.
- [69] Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP) (1972d). Variedad "INIAP" 176: Cuadruplica su producción. Quito, Ecuador: Estación Experimental Santa Catalina.
- [70] Galarza Silva, M. (1981). Variedades de maíz para la Sierra ecuatoriana. Quito, Ecuador: INIAP, Estación Experimental Santa Catalina, Programa de Maíz. (Boletín Divulgativo no. 119).
- [71] Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP). (1981). Cultive maíz blanco "INIAP-101". Quito, Ecuador: Plegable No. 28.
- [72] Moreno, F. (1986). "INIAP-130": variedad de maíz para consumo humano. Quito, Ecuador: INIAP, Estación Experimental Santa Catalina, Programa de Maíz. (Boletín Divulgativo no. 181).
- [73] Galarza Silva, M. (1981). Variedades de maíz para la Sierra ecuatoriana. Quito, Ecuador: INIAP, Estación Experimental Santa Catalina, Programa de Maíz. (Boletín Divulgativo no. 119).
- [74] Caviedes C., M. (1986). "INIAP-180": Nueva variedad de maíz de alto rendimiento. Quito, Ecuador: INIAP, Estación Experimental Santa Catalina, Programa de Maíz. Boletín Divulgativo No. 180.
- [75] Caviedes C., M., y Moreno A., F. (1989a). INIAP-131: Variedad mejorada de maíz de amplia adaptación y buen rendimiento. Quito, EC, INIAP, Estación Experimental Santa Catalina, Programa de Maíz. (Plegable no. 106).
- [76] Caviedes C., M., y Moreno A., F. (1989b). INIAP-198: Variedad mejorada de canguil para la Sierra. Quito, EC, INIAP, Estación Experimental Santa Catalina, Programa de Maíz. (Plegable no. 107).
- [77] Caviedes C., M., Moreno A., F., y Silva C., E. (1990). Nueva variedad de maíz INIAP-192 (chulpi mejorado) para la Sierra ecuatoriana. Quito, EC, INIAP, Estación Experimental Santa Catalina, Programa de Maíz. (Plegable no. 110).



- [78] Moreno A., F., Silva C., E., Dobronsky, J., y Heredia C., J. (1995). INIAP-160: Variedad mejorada de maíz "morocho blanco" para la Sierra ecuatoriana. Quito, Ecuador, INIAP, Estación Experimental Santa Catalina, Programa de Maíz. (Plegable no. 151).
- [79] Silva C., E., Dobronsky, J., Heredia, J., y Monar B., C. (1997). INIAP-111 Guagal mejorado: Variedad de maíz blanco harinoso tardío para la provincia de Bolívar. Quito, Ecuador: INIAP, Estación Experimental Santa Catalina, Programa de Maíz. (Plegable Divulgativo no. 163).
- [80] Dobronski, J., Vásquez, J., y Silva, E. (1998). INIAP-122 "Chaucho Mejorado": Variedad de maíz amarillo harinoso semiprecoz para la provincia de Imbabura. Revista Informativa INIAP, 10, 5-7.
- [81] Silva, E.; Dobronskiy, J.; Caviedes, M.; Yanez, C.; Zambrano, J.L.; Heredia, J. (2000). INIAP-102 "Blanco Blandito Mejorado", Variedad de Maíz Blanco Harinoso Para la Provincia de Chimborazo; Estación Experimental Santa Catalina: Quito, Ecuador, 2000.
- [82] Caviedes, M.; Yáñez, C.; Silva, E.; Dobronsky, J.; Zambrano Mendoza, J.L.; Caicedo, M.; Heredia, J. (2002). Nueva Variedad de Maíz Amarillo Harinoso INIAP-124-Mishca Mejorado; Estación Experimental Santa Catalina: Quito, Ecuador.
- [83] Eguez, J. y Pintado, P. (2013). INIAP-103 "Mishqui Sara", Nueva variedad de maíz blanco harinoso para consumo humano. Cuenca, Ecuador: INIAP, Estación Experimental del Austro, Programa de Maíz.
- [84] Yáñez G., C., Zambrano, J.L., Caicedo, M., Heredia, J., Sangoquiza Caiza, C.A., Villacrés, E., Caballero, D. (2017). INIAP-199 "Racimo de Uva": Variedad de maíz negro. Quito, Ecuador: INIAP, Estación Experimental Santa Catalina, Programa de Maíz/ESPOCH. Plegable Divulgativo No. 20.
- [85] Zambrano, J.L.; Yáñez, C.F.; Sangoquiza, C.A. (2021). Maize Breeding in the Highlands of Ecuador, Peru, and Bolivia: A Review. *Agronomy* 2021, 11, 212. doi: <https://doi.org/10.3390/agronomy11020212>
- [86] Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) (2020). Informe de rendimiento de maíz amarillo invierno 2020. Coordinación General de Sistemas de Información- CGINA, Disponible en: <https://fliphtml5.com/ijja/dxed/basic/>, recuperado el 5 de enero de 2022.
- [87] Crespo, S., y Burbano, M. (1985). INIAP H-550: Un híbrido de maíz para la zona central del Litoral ecuatoriano. Quevedo, Ecuador: INIAP, Estación Experimental Pichilingue, Programa de Maíz. (Plegable no. 83).
- [88] Crespo, S., Burbano, M., y Vasco Medina, S. A. (1990). INIAP H-551: Híbrido de maíz para la zona central del Litoral. Quevedo, Ecuador: INIAP, Estación Experimental Tropical Pichilingue, Programa de Maíz. (Plegable no.112).
- [89] Crespo, S., Valdivieso C., C., y Villavicencio Linzán, J. P. (2003). INIAP H-552: Nuevo híbrido de maíz amarillo cristalino para la zona central del Litoral. Quevedo, Ecuador: INIAP, Estación Experimental Tropical Pichilingue, Programa de Maíz. (Boletín Divulgativo no. 294).
- [90] Reyes, S., Alarcón, D., Carrillo Alvarado, R., Carvajal Mera, T., y Cedeño, N. (2004). INIAP- H -601 Híbrido de maíz para condiciones de laderas del trópico seco ecuatoriano. Portoviejo, Ecuador: INIAP, Estación Experimental Portoviejo, Programa de Maíz. (Plegable Divulgativo no. 201).
- [91] Reyes T., S., Alarcón C., D., Cerón G., O., y Zambrano M., O. (2009). INIAP-H-602: Nuevo híbrido de maíz duro para el Litoral ecuatoriano. Portoviejo, Ecuador: INIAP, Estación Experimental Portoviejo, Programa Maíz. (Pegeble Divulgativo no. 311).
- [92] Zambrano, J., Valdivieso C., C., y Villavicencio Linzán, J. P. (2010). INIAP H-553: Híbrido de maíz para la zona central del Litoral. Quevedo, Ecuador: INIAP, Estación Experimental Tropical Pichilingue, Programa de Maíz. (Plegable Divulgativo no. 304).
- [93] Eguez M., J., Pintado, P., Molina, R., y Narro, L. (2012). INIAP H-824 "Lojanito". Cuenca, Ecuador: INIAP, Estación Experimental del Austro. (Plegable no. 391).
- [94] Eguez Moreno, J. F., Pintado, P.W., Ruilova Narvaez, F. L., Zambrano Mendoza, J. L., Villavicencio Linzán, J. P., Caicedo Villafuerte, M. B., Alarcón Cobeña, D., Zambrano Zambrano, E. E., Limongi Andrade, R., Yáñez Guzmán, C. F., Narro, L., & San Vicente, F. (2019). Desarrollo de un híbrido de maíz de grano blanco para consumo humano en Ecuador. *ACI Avances En Ciencias E Ingenierías*, 11(1), 46-53.
- [95] Alarcón Cobeña, D., Zambrano Zambrano, E., Limongi Andrade, R., y Cerón García, O. (2016). INIAP H-603: Híbrido de maíz duro para Manabí y Los Ríos. Portoviejo, Ecuador: INIAP, Estación Experimental Portoviejo, Programa de Maíz. (Plegable no. 428).



- [96] Caicedo Villafuerte, M.B. y Villavicencio, Linzán, J.P. (2020). Híbrido simple – QPM INIAP H-554 “Renacer”. Mocache, Ecuador: INIAP, Estación Experimental Tropical Pichilingue, Programa de Maíz. (Plegable no. 454).
- [97] Carvajal-Larenas, F.E., Caviedes, M. (2019). Análisis comparativo de la eficiencia productiva del maíz en Ecuador, Sudamérica y el mundo en las dos últimas décadas y análisis prospectivo en el corto plazo. *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías* 11(17), 94-103. doi: <https://doi.org/10.18272/aci.v11i1.1079>
- [98] Sánchez Arizo, Víctor Hugo, & Fernández Sastre, Juan. (2020). El efecto de los paquetes tecnológicos en la productividad del maíz en Ecuador. *Problemas del Desarrollo*, 51(203), 85-110. <https://doi.org/10.22201/ieec.20078951e.2020.203.69527>
- [99] Zambrano, Carlos Edison, & Andrade Arias, Mariela Susana. (2021). Productividad y precios de maíz duro pre y post Covid-19 en el Ecuador. *Revista Universidad y Sociedad*, 13(4), 143-150.
- [100] Molina, R. (2010). *Evaluación de seis híbridos de maíz amarillo duro; INIAP H-601, INIAP H 553, HZCA 317, HZCA 318, austro 1, frente a dos testigos, AGRI 104 y DEKALB DK-7088, sembrados por el agricultor local, en San Juan- cantón Pindal- provincia de Loja* (Tesis de pregrado). Universidad Politécnica Salesiana, sede Cuenca, Ecuador.
- [101] Guamán- Guamán, R.N., Desiderio-Vera, T. X., Villavicencio-Abril, A. F., Ulloa-Cortázar, S. M., Romero-Salguero, E. J. (2020). Evaluación del desarrollo y rendimiento del cultivo de maíz (*Zea mays* L.) utilizando cuatro híbridos. *Siembra* 7(2), 047-056. doi: <https://doi.org/10.29166/siembra.v7i2>
- [102] Andino, J. (2011). Fertilización química en híbridos de maíz (*Zea mays*) en la zona de Balzar, provincia del Guayas (Tesis de Ingeniería). Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Quevedo, Ecuador.
- [103] Moreira-Cortez, B. W. (2019). Evaluación agronómica de híbridos de maíz (*Zea mays* L.), en la época lluviosa en el cantón Mocache, provincia de Los Ríos (Tesis de Ingeniería). Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Quevedo.
- [104] Segovia-Monge, J. P. (2006). Evaluación agronómica de tres híbridos de maíz (*Zea mays* L.) con cinco dosis de doble sulfato de potasio y magnesio, bajo el sistema de siembra directa en la zona de San Carlos- Quevedo (Tesis de Ingeniería). Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, sede Santo Domingo de los Tsáchilas, Santo Domingo de los Tsáchilas, Ecuador.
- [105] Sandal-Paucar, M. S. (2014). Comportamiento agronómico de tres híbridos de maíz (*Zea mays* L.) en el cantón Pueblo Viejo provincia de los Ríos (Tesis de Ingeniería). Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Quevedo, Ecuador.

Proceso editorial

Por favor, revise estas directrices para preparar su manuscrito, pues todos los manuscritos enviados a la revista ACI Avances en Ciencias e Ingenierías deben cumplirlas. Estas directrices le ayudarán a estar seguro que su manuscrito está completo y que el proceso editorial se conducirá lo más ágil posible.

Asegúrese de revisar el Enfoque y Alcance de ACI Avances en Ciencias e Ingenierías así como nuestros Criterios de Publicación para conocer lo que publicamos.

Lea nuestras Políticas Editoriales, incluyendo las Políticas de Sección, Proceso de Evaluación por Pares, Frecuencia de Publicación, Política de Acceso Abierto, y Requisitos de Autoría.

Todos los autores deben cumplir con los requerimientos de autoría establecidos de la política de Requisitos de Autoría de ACI Avances en Ciencias e Ingenierías. Aquellos que hayan contribuido al trabajo pero que no cumplan estos requisitos puede ser mencionados en los Agradecimientos.

El Autor para correspondencia debe ingresar su identificador único ORCID al momento del envío del manuscrito (óptimamente, todos los doctores del manuscrito deberían contar su propio ORCID). +Info sobre ORCID.

Los nombres de los autores se publicarán exactamente como aparecen en el manuscrito. Por favor revise la información con cuidado para asegurarse de que es correcta.

ACI Avances en Ciencias e Ingenierías recibe manuscritos que presentan información original y la evaluación de los manuscritos se realiza a través de un proceso de revisión por pares (*peer-reviewed*) que toma en consideración una determinación objetiva de la robustez científica y metodológica, no en factores subjetivos como "impacto" o "interés".

Revisar los criterios de publicación de la revista y nuestras políticas del proceso de evaluación por pares en el siguiente enlace:

<http://revistas.usfq.edu.ec/index.php/avances/about/editorialPolicies>

Para la organización de los artículos y comunicaciones, la revista se divide internamente en tres secciones:

Sección A: Ciencias Exactas y Físicas

Sección B: Ciencias Biológicas y Ambientales

Sección C: Ingenierías.

ACI Avances en Ciencias e Ingenierías se adhiere a los lineamientos de autoría de la ICMJE. Revisa más detalles sobre los requisitos de autoría en el siguiente enlace: <http://revistas.usfq.edu.ec/index.php/avances/about/editorialPolicies>

DIRECTRICES PARA AUTORES/AS

Por favor, revise estas directrices para preparar su manuscrito, pues todos los manuscritos enviados a la revista **ACI Avances en Ciencias e Ingenierías** deben cumplirlas. Estas directrices le ayudarán a estar seguro que su manuscrito está completo y que el proceso editorial se conducirá lo más ágil posible. Asegúrese de revisar el

Enfoque y Alcance de ACI Avances en Ciencias e Ingenierías así como nuestros Criterios de Publicación, nuestras Políticas Editoriales, incluyendo las Políticas de Sección, Proceso de Evaluación por Pares, Frecuencia de Publicación, Política de Acceso Abierto, y Requisitos de Autoría en el siguiente enlace: <http://revistas.usfq.edu.ec/index.php/avances/about>

La revista ACI Avances en Ciencias e Ingenierías publica contribuciones en español e inglés, todas son sujetas a un proceso de revisión por pares, y se pueden enmarcar en una de las siguientes categorías:

Artículo: Un manuscrito que reporta conclusiones substanciales para el entendimiento de un problema, debiendo ser actualizado y exhaustivo en sus análisis y conclusiones, e incluir el conjunto completo de datos empíricos que soportan las ideas expuestas (se incluyen revisiones sistemáticas de la literatura y meta-análisis). Estos manuscritos usualmente tienen más de 2000 palabras y no hay límite máximo de palabras, figuras o tablas. Estos manuscritos deben tener divisiones con subtítulos (ver sección Organización del manuscrito).

Comunicación: Corresponde a un reporte conciso de un tema de investigación específico destinado a la presentación rápida de resultados novedosos pero de interés puntual. El tipo de información reportada es flexible, y puede incluir manuscritos que prueban nuevas metodologías, que describen observaciones de historia natural, o que presentan datos empíricos puntuales y novedosos. Estos manuscritos usualmente tienen menos de 2000 palabras y pueden incluir máximo tres tablas y tres figuras. El texto de estos manuscritos no tiene divisiones (ver sección Organización del manuscrito).

Ciertos manuscritos podrían ser reclasificados entre Artículos y Comunicaciones a discreción de los Editores de la revista y con el permiso del autor.

PREPARACIÓN DEL MANUSCRITO

Formato de archivo. Para el envío inicial, los manuscritos pueden estar en cualquiera de los siguientes formatos: DOC, DOCX., RTF, o PDF.

Si utiliza Mendeley u otro paquete para sus referencias, debe transformar los campos de Mendeley en texto simple.

Se recomienda que los manuscritos que contengan ecuaciones sean producidos en LaTeX. Manuscritos producidos en LaTeX deben ser enviados en formato PDF (si el manuscrito es aceptado, se le solicitará el archivo *.TEX).

Tipo de letra. Times de 12 puntos

Los encabezados deben ir en mayúsculas y centrados (aquellos descritos en la sección Organización del manuscrito).

En caso de incluir subtítulos adicionales a los encabezados, se los colocará en negrillas y con estilo de oración (primera letra en mayúscula y el resto en minúsculas).

El resto del texto no debe tener ningún tipo de formato adicional, excepto colocar palabras en negrillas y en cursiva. No usar tabulaciones, diferentes tamaños de letra, numeración o estilos para subtítulos, etc.

Diseño de página. Alineación a la izquierda (no justificado), textos a espacio seguido, hojas tamaño A4, márgenes de 2,5 cm a cada lado.

Encabezados. Los encabezados principales se especifican en la sección Organización del manuscrito. Adicionalmente puede haber hasta dos niveles más de subtítulos.

Números de página. Todas las páginas deben estar numeradas de manera secuencial en la esquina inferior derecha.

Notas al pie. No se debe colocar notas al pie, pues toda la información debe estar en el texto principal o en las referencias.

Abreviaciones. Defina las abreviaciones en la primera vez que las usa en el texto (incl. acrónimos, acortamientos, abreviaturas, y siglas).

Mantenga al mínimo el número de abreviaciones. No utilice abreviaciones no estandarizadas al menos que las utilice más de tres veces en el texto.

Formato de referencias. Siga el estilo APA (6a edición). Revise las directrices para citas y referencias.

Ecuaciones. Manuscritos que contengan ecuaciones se recomienda sean producidos con LaTeX.

Utilizar MathType para generar y desplegar ecuaciones, caso contrario también es adecuado Equation Editor.

Numere las ecuaciones al lado derecho entre paréntesis. Por ejemplo: $\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3$ (1)

No utilice MathType o Equation Editor para colocar signos de variables, símbolos griegos, u operadores matemáticos en el texto general del manuscrito. En estos casos, inserte los símbolos como texto normal con los valores Unicode (hex) correctos.

Lenguaje. Escriba el texto y las leyendas de tablas y figuras de manera clara y sin ambigüedades, enfocado en una audiencia internacional. Siga las normas de escritura académica establecidas en el campo al cual corresponde el manuscrito.

Manuscritos en Inglés pueden usar Inglés Americano o Inglés Británico pero de manera consistente.

Manuscritos en Español deben seguir las recomendaciones de la Real Academia de la Lengua Española (con excepción del uso de tilde en "et al.").

Medidas, fechas y hora. Use el Sistema Internacional de Unidades. Puede usar unidades específicas a la disciplina que no son SI solo cuando estas han sido ampliamente adoptadas en dicho campo científico. Coloque un espacio entre el número y el símbolo de la unidad, no coloque un punto al final del símbolo de la unidad, ejemplo: 4 km

Las fechas deben indicarse como Día Mes Año. No abrevie el mes. Ejemplo: 12 de febrero 2015, 14 January 2013

La hora debe seguir el formato de 24 horas, ejemplo: 13h00

Numeración y porcentajes. Escribir los números del 1 al 9 en palabras, a menos que sean unidades.

No incluya un espacio entre el valor y el símbolo de porcentaje, ejemplo: 45%

Coordenadas geográficas. Exprese las coordenadas geográficas en grados decimales. No reporte coordenadas en grados-minutos-segundos o en UTM. Incluya el sistema de referencia geodésico.

Use N/S para denotar latitud y E/W para denotar longitud, independiente el idioma del manuscrito.

Nomenclatura

Nombres científicos de especies se escriben en cursiva. Escriba el género y la especie de manera completa en el título del manuscrito y la primera vez que mencione al organismo en el texto, abstract, resumen, y leyendas de tablas y figuras. Así mismo, escriba el género completo cada vez que lo mencione por primera ocasión en un párrafo o cuando inicie una oración. Luego de la primera mención en el párrafo se puede abreviar género utilizando sólo la primera letra.

Genes, mutaciones, genotipos o alelos se escriben en cursiva. Utilice el nombre recomendado consultando la base de datos apropiada de nomenclatura genética. Usualmente es recomendable indicar los sinónimos para el gen la primera vez que aparece en el texto. Los prefijos de genes tales como los usados para oncogenes o la localización celular deben mostrarse en caracteres de tipo romano (e.g., v-fes, c-MYC).

Compuestos químicos deben tener un nombre sistemático correcto, siguiendo los convenios de la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC). Una vez que se ha proporcionado el nombre sistemático, es aceptable definir un nombre común o un acrónimo y para esto ser utilizado para el resto del texto, tablas y figuras. Los nombres generados por ChemDraw u otro software a partir de fórmulas gráficas introducidas deben ser verificados para guiones adicionales y otras desviaciones de las convenciones de la IUPAC. Los nombres sistemáticos o genéricos deben usarse para productos comerciales en lugar de nombres patentados o de marca registrada.

Sustancias farmacéuticas deben mencionarse bajo la Denominación Común Internacional (DCI, o INN International Nonproprietary Name)

Evidencia en estudios biológicos. Si su manuscrito utiliza datos de organismos biológicos, se debe declarar explícitamente la disponibilidad de la evidencia bajo una de las siguientes opciones:

Especímenes voucher depositados en colecciones científicas abiertas al público (es necesario indicar el nombre de la colección y los números de catálogo de los especímenes).

Secuencias de aminoácidos o genes depositadas en GenBank o un repositorio equivalente (indicando el nombre del repositorio y los códigos de acceso).

Fotografías, grabaciones de audio o video enviadas como parte de las figuras o como material suplementario del manuscrito.

Fotografías, grabaciones de audio o vídeo que han sido depositadas en un repositorio institucional o público (por ejemplo, Macaulay Library, o xeno-canto), para las cuales es necesario indicar el nombre del repositorio y citar el registro usando el formato de citación APA para recursos electrónicos e incluirlo en la sección de Referencias.

La colección de datos de organismos biológicos debe realizarse de acuerdo a la legislación nacional e internacional vigente. Es imprescindible que los permisos de investigación y colección otorgados por las autoridades competentes se indiquen en la sección de Agradecimientos del manuscrito.

Datos y códigos. Si su manuscrito se basa en análisis de datos sin procesar (raw data) o códigos, estos deben estar a disposición de los revisores. Por favor, envíelos por una de las siguientes vías:

- Como enlaces a un repositorio donde los datos son accesibles y citados en el manuscrito. Este repositorio puede ser institucional, comercial o de acceso abierto (por ejemplo, figshare o Dryad)
- Como archivos de Material Suplementario.

Si el manuscrito es aceptado, los datos deberán hacerse públicos de tal forma que los datos estén disponibles públicamente para todos los investigadores interesados.

Sin embargo, entendemos que pueden haber restricciones éticas y legales que prohíban la apertura de los datos, por lo que cuando exista legislación o marcos éticos locales que llamen a evitar o limitar la liberación de datos, los autores deben dejar estas limitaciones claras al momento del envío de su manuscrito (en la sección de Comentarios para el editor/a).

Posibles excepciones a la disponibilidad de datos públicos incluyen: datos que no pueden ponerse a disposición del público pues comprometería la confidencialidad o la privacidad del participante; o datos que de ponerse a disposición pública podrían presentar alguna amenaza, como revelar las ubicaciones de depósitos fósiles, especies en peligro de extinción, etc.

Si los datos sin procesar o los códigos pertenecen a terceros y Ud. no tiene permiso para publicarlos, debe presentar la fuente y la verificación del permiso de uso de los datos así como la Información de contacto donde un investigador interesado tendría que aplicar para obtener acceso a los datos pertinentes, en la sección Materiales y Métodos. Sin embargo, tenga en cuenta que los autores son responsables de asegurarse de que los datos estarán disponibles a partir de la publicación, de la misma manera que los autores obtuvieron los datos.

ORGANIZACIÓN DEL MANUSCRITO

1. La primera página del manuscrito debe incluir las siguientes partes, cada una separada por una línea:

- **Título del artículo:** En negrillas, con máximo 300 caracteres, debe ser específico, descriptivo, conciso y comprensible para los lectores fuera del campo. Sólo la primera palabra y los nombres propios empiezan con mayúsculas. Puede dividirse en título y subtítulo, separados por el signo de puntuación dos puntos (:). Para revisiones sistemáticas o meta-análisis, el subtítulo debe incluir el diseño del estudio.
- **Título abreviado:** En negrillas, con máximo 100 caracteres, describe el tópico de estudio. Sólo la primera palabra y los nombres propios empiezan con mayúsculas.
- **Nombres de los Autores:** Presente los nombres de los autores tanto en la primera página del manuscrito como en la plataforma de la revista. Para cada autor debe incluir el primer nombre, el segundo nombre (o su inicial, si la usa) y los apellidos. Los autores se separan entre sí por comas (no colocar y, and, &).
- **Afiliaciones:** Cada autor de la lista debe tener una afiliación. La afiliación debe incluir al menos el nombre de la organización o universidad y su ubicación. Las afiliaciones se asociarán con los autores por medio de superíndices numéricos. Múltiples afiliaciones por autor se separarán en líneas diferentes y con superíndices propios. Se marcará al autor responsable del manuscrito con un asterisco junto a los superíndices, asociado con la frase "Autor para Correspondencia / Corresponding Author, e-mail:" seguido por el correo electrónico. Si todos los autores comparten la misma afiliación o si hay un solo autor no usar superíndices numéricos. Si hay un solo autor, no incluir la frase "Autor Principal / Corresponding Author"
- **Título en idioma alternativo:** Si su manuscrito es en Español, el título alternativo es la traducción en Inglés, y viceversa.
- **Abstract:** En Inglés, redactado como un párrafo continuo de máximo 400 palabras. Detalla brevemente los principales objetivos del estudio; explica cómo se realizó el estudio, incluyendo cualquier organismo modelo utilizado, pero sin entrar en detalles metodológicos; resume los resultados más importantes y su significado. No debe incluir citas bibliográficas ni abreviaciones y no debe estar separado en párrafos.
- **Keywords:** Máximo 10 palabras o grupos de palabras en Inglés. Deben ser diferentes a lo que aparece en el título del manuscrito.
- **Resumen:** Es la traducción al Español del Abstract, y tiene sus mismas características.
- **Palabras clave:** Máximo 10 palabras o grupos de palabras en Español. Deben ser diferentes a lo que aparece en el título del manuscrito.

- Se puede incluir un tercer resumen en Portugués, Francés, Italiano, Alemán u otra lengua, si lo considera necesario.
2. Desde la siguiente página se presentarán el texto organizado por encabezados, luego las tablas y las figuras del manuscrito. La organización dependerá del tipo de contribución. Se sugiere usar una organización según el método científico, por ejemplo:

Organización de un manuscrito sometido

como Artículo

Introducción
Materiales y métodos
Resultados
Discusión
Agradecimientos
Referencias
Contribuciones de los autores
Tablas
Figuras

Organización de un manuscrito sometido

como Comunicación

Texto (sin divisiones)
Agradecimientos
Referencias
Contribuciones de los autores
Tablas
Figuras

Otras secciones pueden ser: revisión de literatura, conclusiones, recomendaciones. La estructura del artículo será revisado por y evaluado el/los editor(es) y los revisores.

3. En los **Agradecimientos** se incluye:

- Declaración explícita de las fuentes de financiamiento que permitieron el desarrollo del trabajo.
- Los detalles de los permisos o autorizaciones para el desarrollo de la investigación y las instituciones que los emitieron.
- Aquellos que hayan contribuido al trabajo pero que no cumplan con los requisitos de autoría pueden ser mencionados en los Agradecimientos con una descripción de sus contribuciones.
- Los autores son responsables de asegurarse que toda persona nombrada en los agradecimientos está de acuerdo con eso.

4. La sección de **Contribuciones de los Autores** es necesaria cuando hay más de un autor. Se debe describir la contribución de cada uno de los autores para el desarrollo del artículo de manera explícita pero sucinta. La contribución puede ser:

- concepción de la investigación;
- diseño de la metodología;
- curación de datos para la investigación;
- administración del proyecto;
- adquisición, análisis o interpretación de los datos, incluyendo las labores de campo, laboratorio, experimentales, estadísticas, o el soporte técnico;
- adquisición de fondos;
- provisión de recursos, incl. equipos, materiales, reactivos, entre otros;
- desarrollo de software;
- supervisión o tutoría;
- validación y verificación de los resultados;
- redacción del manuscrito;
- revisión crítica del contenido intelectual del manuscrito;
- producción de tablas, figuras o material complementario.

Ejemplo:

María Álvarez y Pedro Pérez concibieron la investigación; Juan Norton y María Álvarez desarrollaron la metodología y realizaron el trabajo de campo; Juan Norton, Jonathan Castro y Pedro Pérez diseñaron el modelo y corrieron los análisis; Jonathan Castro y María Álvarez realizaron los análisis moleculares; Pedro Pérez proveyó reactivos; Juan Norton y Jonathan Castro redactaron el manuscrito; Juan Norton, Jonathan Castro, Pedro Pérez, María Álvarez y Pedro Pérez revisaron críticamente el contenido intelectual del manuscrito; Juan Norton tomó las fotografías de las figuras 1 y 3. Recuerde que la autoría del manuscrito debe seguir los lineamientos de autoría de la ICMJE.

DIRECTRICES PARA REFERENCIAS

- En el texto, usar citas numeradas colocadas al final de la oración entre corchetes. Los números de citas diferentes deben separarse por comas, a menos que sea un rango continuo de citas en cuyo caso se usará un guion. Ejemplos: [10] [10,15,22] [12-20].
- Numerar las citas secuencialmente según aparecen en el texto (NO en orden alfabético de las referencias).
- Citar los trabajos sin publicar, en preparación o en proceso de revisión como "(datos sin publicar)", precedido por las iniciales y apellido del autor. Por ejemplo: A. Suárez (datos sin publicar)
- Se debe evitar las citas de información proveniente de correos electrónicos, cartas o documentos enviados entre colaboradores, pero si es absolutamente necesario, se deben referir como "com. pers." cuando corresponden a comentarios sin respaldo de correspondencia, y como "in litt." cuando hubo correspondencia escrita. En ambos casos, precedidos por las iniciales y apellido del colaborador y seguida del año. Por ejemplo: (J. Muñoz in litt. 2009) (J. Muñoz com. pers. 2010)
- Subtitular la lista de referencias como Referencias (no Bibliografía o Literatura Citada).
- Ordenar la lista de Referencias de acuerdo al orden secuencial que aparecen en el texto del manuscrito (NO en orden alfabético).
- El formato de las referencias debe seguir el estilo APA (6a Edición). Este estilo arma cada referencia con los siguientes componentes generales:
- Autores. (Año). Título de la obra. Datos de publicación.
- Ejemplos:

Artículo en revista impresa:

Andersson, L. G. (1945). Batrachians from East Ecuador, collected 1937, 1938 by Wm. Clarke-Macintyre and Rolf Blomberg. *Arkiv för Zoologi* (Stockholm), 37A(2), 1–88.

Artículo en revista con URL:

Ahlman, R. (2016). Green-winged Teal *Anas crecca carolinensis*, first record for Ecuador. *Cotinga*, 38, 40. Recuperado de <http://www.neotropicalbirdclub.org/wpcontent/downloads/C38online/Ahlman.pdf>

Artículo en revista con DOI:

Jacobsen, D., Schultz, R., & Encalada, A. (1997). Structure and diversity of stream invertebrate assemblages: the influence of temperature with altitude and latitude. *Freshwater Biology*, 38(2), 247–261. doi: <http://www.dx.doi.org/10.1046/j.1365-2427.1997.00210.x>

Libro impreso:

Diamond, J. (2006). *The Third Chimpanzee: The evolution and future of the human animal*. New York: Harper Perennial.

Libro con URL:

Suber, P. (2102). Open Access. The MIT Press Essential Knowledge Series. Cambridge: The MIT Press. Recuperado de <http://bit.ly/oa-book>

Libro con editores con DOI:

Walsh, S. J., & Mena, C. F. (Eds.). (2012). *Science and conservation in the Galapagos Islands: frameworks & perspectives*. Vol. 1. New York: Springer Science & Business Media. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4614-5794-7>

Capítulo de un libro impreso:

Minogue, K. (2014). Does the idea of "self-interest" explain the character of modern free societies? En P. Lucio Paredes & S. Oleas (Eds.), *The Complexity of Liberty: Selected essays from the Mont Pelerin Society Special Meeting in Galápagos June 2013*. Quito: Universidad San Francisco de Quito.

Capítulo de un libro con DOI:

Maldonado, M., Maldonado-Ocampo, J. A., Ortega, H., Encalada, A. C., Carvajal-Vallejos, F. M., Rivadeneira, J. F., Acosta, F., Jacobsen, D., Crespo, A. & Rivera-Rondón, C. A. (2011). Biodiversity in aquatic systems of the Tropical Andes. En S. K. Herzog, R. Martinez, P. M. Jorgensen, & H. Tiessen (Eds.), *Climate change and biodiversity in the tropical Andes* (pp. 276–294). Paris/São José dos Campos: Inter-American Institute for Global Change Research (IAI) and Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE). Recuperado de <http://www.iai.int/wp-content/uploads/2014/06/book.pdf>

Disertación:

Brandt, M. (2003). Influencia del erizo lapicero (*Eucidaris thouarsii*) en la estructura de la comunidad submarina de la cara norte del Isote Caamaño, Galápagos (Tesis de Licenciatura). Universidad San Francisco de Quito USFQ, Quito.

Enciclopedia en línea (cita global de toda la enciclopedia):

Frost, D. R. (2016). Amphibian Species of the World: an Online Reference (Version 6.0). American Museum of Natural History. Recuperado el 5 de febrero de 2017 de <http://research.amnh.org/herpetology/amphibia/index.html>

Ficha en enciclopedia en línea con URL:

Frost, D. R. (2016) *Nymphargus buenaventura* (Cisneros-Heredia and Yáñez-Muñoz, 2007). En Amphibian Species of the World: an Online Reference (Version 6.0). American Museum of Natural History. Recuperado el 5 de febrero de 2017 de <https://web.archive.org/web/20170206001235/http://research.amnh.org/vz/herpetology/amphibia/Amphibia/Anura/Centrolenidae/Centroleninae/Nymphargus/Nymphargus-buenaventura>

Noticia en periódico en línea:

En el limbo futuro de telescopio en Arecibo (2017, enero 30). El Universo. Recuperado de <https://web.archive.org/web/20170206002227/http://www.eluniverso.com/vida-estilo/2017/01/30/nota/6023449/limbo-futuro-telescopio-arecibo>

- Separar cada autor con una coma, y colocar "&" antes del último autor. Las iniciales de los nombres de los autores van después de los apellidos. Indicar todos los autores y no usar et al.
- Incluir el número de la revista entre paréntesis luego del volumen, si está disponible.
- Separar el rango de páginas por un guion n (-). No confundir esto con un guion simple (-).
- Colocar el DOI (Digital Object Identifier) en todas las referencias que lo tengan disponible, precedido por "doi:". El DOI debe estar en formato de enlace largo: <http://doi.org/xxx.xxx.xxx>
- No colocar un punto después del DOI .
- Si un DOI no está disponible (debe hacer una búsqueda exhaustiva), colocar un enlace estable hacia el sitio web de la revista (por ejemplo, el enlace estable de JSTOR) o un repositorio institucional (por ejemplo, Archive.org), con el texto "Recuperado de". No colocar enlaces a páginas web personales, servicios no-permanentes de carga/descarga de archivos.
- Para incluir la dirección de Internet o URL de una página que podría cambiar en el futuro debe primero respaldar dicho URL en un archivo digital que resguarden dicha referencia para el futuro. Para esto puede usar Wayback Machine de Internet Archive <https://archive.org/web/> o el sistema archive.is <http://archive.is>. Esto debe ser hecho en particular para páginas que provienen de enciclopedias en línea, periódico de noticias, páginas personales o institucionales.
- Cuando se hace referencia a publicaciones en línea que tienen fechas específicas (como los blogs), se debe colocar (Año, Mes día) y no solo el año.
- Colocar Anónimo cuando no exista un autor determinado.
- Colocar n/f cuando no se conozca el año de publicación.
- Citar manuscritos aceptados para publicación como "in press" solamente si ya tiene la información de publicación del artículo (número de la revista y páginas). Artículos que no tengan esta información son considerados aceptados, pero no en prensa y serán citados como "datos en proceso de publicación" dentro del texto, pero no se incluirán en las Referencias Bibliográficas.
- No se aceptará literatura gris entre las referencias bibliográficas. La literatura gris corresponde a documentos que no están disponibles por canales bibliográficos regulares (como bibliotecas o bases de datos en línea), y usualmente corresponde a reportes técnicos, informes y otros trabajos sin publicar. De ser en extremo necesario, su uso será autorizado por el Editor del manuscrito. Sin embargo, es preferible considerar la opción de colocar esa información como "datos sin publicar" o "comunicación personal". De ser aprobada su inclusión como referencia, una copia del documento de literatura gris debe ser depositada en la Biblioteca de la USFQ.

DIRECTRICES PARA TABLAS

- Citar tablas en el texto con numerales arábigos en el orden que aparecen. Ejemplos: "Tabla 1" "Tablas 1–3"
- Colocar las tablas luego del texto, cada una iniciará en su propia página.
- Las tablas deben alcanzar en una hoja A4 con márgenes de 2,5 cm, pudiendo esta orientarse de manera vertical y horizontal, según sea mejor para la apariencia de la tabla.
- Cada tabla debe tener su propia leyenda explicativa, la cual debe ser comprensible sin hacer referencia al texto y será colocada antes de la tabla. Cada leyenda empezará con el número de la tabla. Ejemplo:
TABLA 1. Comparación de los efectos...
- Incluir unidades en los encabezados de columnas y filas entre paréntesis.
- De ser necesarias, colocar notas al pie de la tabla enlazadas con los siguientes símbolos en el mismo orden: *, †, ‡, §, ¶. Sin embargo, es preferible colocar cualquier aspecto importante como parte de la leyenda.

DIRECTRICES PARA FIGURAS

- Avances en Ciencias e Ingenierías publica sin costo figuras a color, siempre y cuando se relacionen directamente con el manuscrito.
- El término Figura hace referencia a todo tipo de imágenes, incluyendo gráficos, dibujos, fotografías y mapas.
- Citar figuras en el texto con numerales arábigos en el orden que aparecen usando la abreviatura "Fig". Ejemplo: "Figs. 1–3"
- En el envío inicial, las figuras deben ir en baja resolución, siempre que sean legibles, e incluidas en el archivo de texto del manuscrito, luego de las tablas. Sin embargo, una vez aceptado el manuscrito, las figuras deben ser enviadas en resolución alta (mínimo 300 dpi, recomendable 600 dpi) en uno de los siguientes formatos: *.tiff, *.eps, *.emf, *.bmp, como documentos separados del archivo de texto.
- Cada figura irá en su propia página y precedida por su leyenda. La leyenda será autoexplicativa, debiendo ser comprensible sin hacer referencia al texto y será colocada antes de la figura. Cada leyenda empezará con el número de la figura. Ejemplo:

FIGURA 1. Mapa de la región...

- Figuras dibujadas con líneas (line artwork) se preparan mejor en programas gráficos basados en vectores (e.g. Corel Draw, Illustrator, Freehand, Inkscape, ArcView). Por lo que es recomendable presentarlas en formato EPS. No use líneas de un ancho menor a 0.3 puntos.
- Las fotografías en blanco y negro, fotografías a color y mapas y gráficos realizados en programas basados en raster (e.g. Photoshop, Gimp) es recomendable que sean enviadas en formato *.tiff. Para archivos *.tiff, note que la resolución es irrelevante, es importante el tamaño en píxeles, por lo que recomendamos un tamaño mínimo de 1000 píxeles.
- Todo manuscrito que incluya un sitio de estudio debe incluir un mapa del mismo. Dicha figura debe: (1) ir rodeada de un borde con líneas delgadas, (2) estar geográficamente referenciado con algunas marcas de latitud y longitud y con un pequeño mapa insertado que indique la localización general, (3) tener una barra de escala en km, (4) tener una flecha que indique el Norte (no usar una rosa de los vientos), y (5) tener líneas de referencia como límites de países, carreteras, ríos o elevaciones, extendiéndose hasta el borde.
- Para todas las figuras use líneas con un grosor entre 0.3-1.0 puntos y tamaños de letra de 12 puntos.
- Todas las letras y textos usados dentro de las figuras deben ir en Times.
- Si es que desea agregar varias imágenes como una sola figura compuesta o crear una lámina con varias imágenes que ocupe toda una página, no se preocupe por el diseño de la misma. En el primer envío del manuscrito no debe armar dicha figura, sino que debe colocar la leyenda de la figura y luego pegar cada imagen separada. Cada imagen debe tener su propia denominación a través de literales en mayúsculas (ej. A) colocados en la esquina inferior derecha de cada imagen. Cuando el manuscrito avance en el proceso de publicación, el equipo de diseño de la revista se ocupará de armar y diseñar sus imágenes compuestas o láminas.
- Recuerde que las figuras serán ajustadas al tamaño de una o dos columnas en una página A4, por lo que todos los elementos de la imagen deben ser lo suficientemente grandes para ser legibles después de la reducción de tamaño, en especial los textos internos y las líneas.

- Eliminar espacios blancos o vacíos innecesarios alrededor de las figuras.
- Incluir los créditos respectivos de la figura en la leyenda. Recuerde que es responsabilidad del autor tener los permisos necesarios para poder reproducir la figura bajo la Licencia Creative Commons de la revista.
- Si usa un mapa como una figura, debe citar la fuente del mapa. De ser posible, use mapas que sean de uso público o que permitan su uso irrestricto. Si usa Google Earth o Google Maps, debe seguir los lineamientos de atribución de Google.

DIRECTRICES PARA MATERIAL SUPLEMENTARIO

- Los autores pueden publicar material suplementario junto a su manuscrito. Este material corresponde a información que complementa o provee soporte al manuscrito publicado y que se podrá descargar como archivos independientes.
- Diferentes tipos de información pueden ser incluidos como material suplementario: textos extensos sobre metodologías, bases de datos, archivos de vídeo, de audio, fotográficos y otros respaldos audiovisuales, entre otros.
- Los Materiales Suplementarios reemplazan a los Apéndices.
- Estos materiales serán citados al final del manuscrito con enlaces al portal de la revista donde estarán a disposición del público de manera gratuita.
- Si el material suplementario está compuesto por texto, debe ser presentado con el mismo formato general requerido para el manuscrito.
- De ser necesario, citar archivos de Material Suplementario en el texto siguiente el siguiente formato: Fig. S1, Tabla S1, Datos S1, Vídeos S1, Artículo S1, Audio S1. Donde la S indica que es material suplementario, y el número indica la secuencia numérica de dicho material.
- Para maximizar compatibilidad, sugerimos que envíe su Material Suplementario en los siguientes formatos: Imágenes en JPG, EPS o PNG; tablas en XLS o XLSX; textos en PDF; vídeos en AVI, MOV o MP4, y archivos de audio en WAV o MP3.
- Sets grandes de datos suplementarios se pueden presentar en formato comprimido (zip o tar).

DIRECTRICES SOBRE NOMENCLATURA BIOLÓGICA Y DESCRIPCIÓN DE NUEVAS ESPECIES

- ACI Avances en Ciencias e Ingenierías cumple con los requisitos establecidos por los diferentes códigos de nomenclatura sobre la validez para la descripción de nuevas especies y la disponibilidad de los artículos en línea como trabajos publicados, incluyendo el International Code of Zoological Nomenclature y el International Code of Nomenclature for algae, fungi, and plants.
- La revista se encargará de obtener los registros y el GUID (LSID) en Zoobank, IPNI y Mycobanl o Index Fungorum.
- Todos los artículos y comunicaciones de ACI Avances en Ciencias e Ingenierías están siendo depositados en Internet Archive [Archive.org](https://archive.org) y en el repositorio USFQ.
- Los autores deben adherirse a los lineamientos establecidos por los códigos internacionales de nomenclatura respectiva al organismo tratado.
- Las descripciones de especies nuevas de seres vivos o los análisis taxonómicos deben seguir lo establecido en el respectivo código de nomenclatura.
- Cuando un taxón biológico es mencionado por primera vez, se debe escribir su nombre común (como nombre propio) seguido por su nombre científico en cursiva, por ejemplo: Oso de Anteojos *Tremarctos ornatus*. No colocar el nombre científico o el nombre común entre paréntesis. Más adelante en el manuscrito se puede usar solamente el nombre científico o el nombre común.
- Si el manuscrito corresponde a un análisis taxonómico o si existe controversia en relación a la nomenclatura del organismo estudiado, presentar el nombre del taxón seguido por los datos de autoría taxonómica al mencionarlo por primera. Los datos de autoría taxonómica de nombres zoológicos son los apellidos de los descriptores y el año de descripción, separados por una coma, ejemplo: *Grallaria ridgelyi* Krabbe et al., 1999. La autoría taxonómica de nombres botánicos debe seguir lo especificado en The International Plant Names

Index. Colocar la autoría taxonómica entre paréntesis solo si existió un cambio a nivel del género. Cuando hay tres o más descriptores utilizar “et al.” sin cursivas.

ENVÍO DEL MANUSCRITO

1. Todos los manuscritos sometidos a la revista ACI Avances en Ciencias e Ingenierías deben ser enviados a través del portal en línea. En la sección Envíos en Línea podrán registrarse y crear un Nuevo Envío.
2. Si manuscrito tiene más de un autor, por favor incluya la información de todos los autores en el sistema (incluyendo sus correos electrónicos).
3. Al momento de someter su manuscrito, debe indicar el nombre, institución y correo electrónico de por lo menos cuatro posibles revisores que podrían hacer la evaluación de pares académicos de su manuscrito. Estas personas deben ser capaces de proveer una evaluación objetiva de su manuscrito, por lo que no pueden pertenecer a la institución de ninguno de los autores, ni estar involucrados en el estudio de manera directa o indirecta. El equipo editorial de la revista se reserva el derecho de seleccionar a los revisores sugeridos al momento del envío del manuscrito o de buscar a otros revisores.
4. Para el envío inicial, el manuscrito debe consistir de un solo archivo que incluya: el texto, las tablas y figuras. Las tablas y las figuras deben ir luego del texto (no intercaladas en el texto). Cada tabla y figura irá en su propia página y estará precedida por su leyenda. En caso de enviar Material Suplementario, deberá ser enviado como archivos separados y subidos al momento del envío inicial.
5. Si es que algunas de las figuras de su manuscrito es una figura compuesta por varias imágenes, no debe armar dicha figura sino que debe colocar la leyenda de la figura y luego pegar cada imagen separada. Cada imagen debe tener su propia denominación a través de literales en mayúsculas (ej. 5A) colocados en la esquina inferior derecha de cada imagen.
6. La revista mantendrá comunicación directa con el autor para correspondencia, quien es el responsable de someter el manuscrito, recibir las revisiones, enviar el manuscrito revisado, aprobar la corrección de originales y las pruebas de imprenta.

LISTA DE COMPROBACIÓN PARA LA PREPARACIÓN DE ENVÍOS

Como parte del proceso de envío, los autores/as están obligados a comprobar que su envío cumpla todos los elementos que se muestran a continuación. Se devolverán a los autores/as aquellos envíos que no cumplan estas directrices.

- El estudio presenta los resultados de investigación científica primaria.
- El envío no ha sido publicado previamente ni se ha sometido a consideración en otra publicación.
NOTA: ACI Avances en Ciencias e Ingenierías apoya a los autores que desean compartir su trabajo de manera temprana a través de archivos/repositorios de prepublicaciones (preprint servers/repositorios), incluyendo arXiv, bioRxiv, figshare, PeerJ Preprints, SSRN, Zenodo, entre otros. De igual forma consideramos manuscritos que han salido únicamente como tesis en repositorios institucionales o trabajos que han sido presentados en actas de conferencias.
- Todas las metodologías de análisis, tanto experimentales, estadísticas y otras, se han realizado bajo estándares técnicos de alta calidad y se describen en suficiente detalle para garantizar su reproducibilidad.
- Todas las conclusiones se pasan en la interpretación justificada y apropiada de los resultados. Los autores deben evitar exagerar el alcance de sus conclusiones y si bien pueden discutir el posible impacto de sus resultados deben identificar sus ideas como hipótesis y no como conclusiones.
- Los textos están escritos de una manera entendible y clara, teniendo un correcto uso del lenguaje. Los manuscritos aceptados por la revista ACI Avances en Ciencias e Ingenierías pasan por una corrección del lenguaje y estilo, sin embargo errores en el uso del lenguaje pueden nublar el correcto entendimiento del contenido y provocar evaluaciones negativas por parte los revisores.
- El estudio debe cumplir con todos los estándares aplicables de ética en la experimentación e integridad científica. Todos los estudios relacionados con seres vivos, líneas celulares, muestreo de campo o que tengan potenciales implicaciones de bioseguridad deben contar con las aprobaciones de un comité de ética institucional / IRB, así como con todos los permisos legales requeridos por el país donde se realiza la investigación.

- El manuscrito sigue estándares utilizados por la comunidad de su disciplina científica y garantiza la disponibilidad de los datos. La disponibilidad de los datos se puede realizar colocándolos como material suplementario del manuscrito o depositándolos en repositorios digitales confiables.
- Todos los autores han participado en el desarrollo del manuscrito, lo han leído y están de acuerdo con su envío a la revista ACI Avances en Ciencias e Ingenierías, y de ser aceptado, están de acuerdo que sea publicado según a la *Política de Acceso Abierto de la revista*.
- Todos los autores cumplen con los requisitos de autoría detallados en la *Política de Autoría*.
- El envío inicial del manuscrito consiste de un solo archivo, que incluye: el texto, las tablas y figuras en el mismo archivo. Las tablas y las figuras van luego del texto (no intercalarlas con el texto). Cada tabla y figura está en su propia página y está precedida por su leyenda. En caso de enviar Material Suplementario, se lo envía como archivos separados.
- Si es que hay figuras compuesta por varias imágenes, se colocó la leyenda de la figura y luego se pegó cada imagen separada. Cada imagen tiene su propia denominación a través de literales en mayúsculas (ej. A) colocados en la esquina inferior derecha de cada imagen.
- Siempre que sea posible, se proporcionan DOI o direcciones URL estables para las referencias.

AVISO DE DERECHOS DE AUTOR/A

Los autores que publiquen en la revista ACI Avances en Ciencias e Ingenierías aceptan los siguientes términos:

- La revista está considerada como una publicación de acceso abierto (*open access*) regida bajo los parámetros de la Licencia de reconocimiento de Creative Commons.
- Los autores conservarán sus derechos de autor y garantizarán a la revista el derecho de primera publicación de su obra, la cual estará simultáneamente sujeto a la Licencia de reconocimiento de Creative Commons que permite a terceros compartir la obra siempre que se indique su autor y su primera publicación esta revista.
- Los autores podrán adoptar otros acuerdos de licencia no exclusiva de distribución de la versión de la obra publicada, pudiendo de esa forma publicarla en un volumen monográfico o reproducirla de otras formas, siempre que se indique la publicación inicial en esta revista.
- Se permite y se recomienda a los autores difundir su obra a través de Internet:
- Antes del envío a la revista, los autores pueden depositar el manuscrito en archivos/repositorios de pre-publicaciones (preprint servers/repositories), incluyendo arXiv, bioRxiv, figshare, PeerJ Preprints, SSRN, entre otros, lo cual puede producir intercambios interesantes y aumentar las citas de la obra publicada (Véase *El efecto del acceso abierto*).
- Después del envío, se recomienda que los autores depositen su artículo en su repositorio institucional, página web personal, o red social científica (como Zenodo, ResearchGate o Academia.edu).

DECLARACIÓN DE PRIVACIDAD

Los nombres y las direcciones de correo electrónico introducidos en esta revista se usarán exclusivamente para los fines establecidos en ella y no se proporcionarán a terceros o para su uso con otros fines.



Red Latinoamericana del Maíz



aci
avances
en ciencias e
ingenierías

